REVELAN CÓMO EVOLUCIONA NUESTRA CIUDAD Y QUIÉNES ESTÁN IMPULSANDO SU TRANSFORMACIÓN.

¿Dónde invertir primero? Del conocimiento al valor

Capacidades de innovación, sectores estratégicos y retos: una ruta para conectar el conocimiento de Medellín con su desarrollo económico y social

Octubre 2026 - V1.0



ELABORADO POR: CENTRO DE PENSAMIENTO

DESARROLLADO POR:
CENTRO DE PENSAMIENTO.

ruta n MEDELLÍN

Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación

Información editorial y nota institucional

TÍTULO	¿Dónde invertir primero? Del conocimiento al valor
ENTIDAD RESPONSABLE	Corporación Ruta N
UNIDAD RESPONSABLE	Centro de Pensamiento de la Corporación Ruta N
AUTORES	Juan Sebastián Rodríguez Cuartas; Edwin Peláez Baena; Álvaro Agudelo Arredondo; Salim Chalela Naffah; Yessica Gutiérrez López
FECHA	Octubre de 2026
EDICIÓN	V1.0
TIPO	Informe de contexto interno
FORMATO	Digital
IDIOMA	Español

Centro de Pensamiento de la Corporación Ruta N

El informe se enmarca en el trabajo de análisis y generación de conocimiento del Centro de Pensamiento de la Corporación Ruta N. Su propósito es aportar elementos para comprender los retos y oportunidades del ecosistema de ciencia, tecnología e innovación y apoyar la reflexión estratégica en el territorio.

Autoría y alcance

Las interpretaciones y recomendaciones aquí presentadas corresponden a los autores identificados y se apoyan en las fuentes y el alcance metodológico descritos en el documento. El contenido tiene carácter informativo y no constituye asesoría jurídica, financiera ni recomendación de inversión. La mención de organizaciones, iniciativas o tecnologías es descriptiva y no implica respaldo comercial. Para reutilizar materiales de terceros, consúltese la fuente original y las condiciones aplicables.

Referencia sugerida

Rodríguez Cuartas, Juan Sebastián; Peláez Baena, Edwin; Agudelo Arredondo, Álvaro; Chalela Naffah, Salim; Gutiérrez López, Yessica (2026). *Estrategia MDE como motor regional de transformación y transferencia*. Informe de Contexto Interno. Centro de Pensamiento de la Corporación Ruta N.

Índice

Introducción **5**

1. Capítulo: Marco Conceptual **6**

1.1. Defininiciones **6**

1.1.1. Capacidades de Innovación según el Marco OMPI 6

1.1.2. Significancia e Indicadores Metodológicos del Modelo de Capacidades de Innovación de la OMPI 7

1.1.3. Transición metodológica hacia la escala territorial: Contexto territorial de Antioquia y Medellín 8

1.1.4. Estándar GICS y Clasificación de Sectores Industriales 9

1.1.5. Concepto Metodológico de Grupo Industrial 9

1.1.6. Cruce Metodológico entre Capacidades de Innovación (OMPI) y Grupos Industriales (GICS) 10

1.1.7. Concepto de Clúster como aglomeración integrada de Capacidades 11

2. Identificación de Clústeres **13**

2.1. Homologación Grupos Industriales GICs Vs Categorías OMPI (Capacidades) **13**

2.2. Conformación conceptual de clústeres territoriales **15**

2.2.1. Perfil de cada dimensión 23

2.2.2. Capacidades más compartidas resaltadas en el tablero 23

2.3. Entendimiento de las Dinámicas productivas, comerciales y laborales de los clústeres **23**

2.3.1. Clúster Agroindustria, Alimentos y Nutrición 24

2.3.2. Clúster: Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos 27

2.3.3. Clúster Energía y Sostenibilidad Ambiental 30

2.3.4. Clúster Hábitat Sostenible y Estilo de Vida 32

2.3.5. Clúster Manufactura Avanzada y Materiales 34

2.3.6. Clúster Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida 36

2.4. Criterios de Madurez y Dinamismo de las dinámicas productivas, comerciales y laborales de los clústeres **38**

2.4.1. Madurez 40

2.4.2. Dinamismo 41

2.5. Priorización de clúster bajo criterios de Madurez y Dinamismo **41**

2.5.1. Definición de Criterios y Reglas de Evaluación 44

2.5.2. Evaluación de Clústeres (Puntajes Brutos) 46

2.5.3. Datos normalizados 46

2.5.4. Clústeres priorizados según criterios de Madurez y Dinamismo 48

2.5.5. Matriz de priorización estratégica 49

2.5.6. Resumen Analítico 50

2.6. Entendimiento de retos territoriales CAME **51**

2.6.1. Clasificación retos CAME 51

2.6.2. Racionalidad y Metodología de los Cruces Estratégicos 52

2.6.3. Priorización de clústeres por medio de retos CAME 64

2.6.4. Fundamento del Documento Base 64

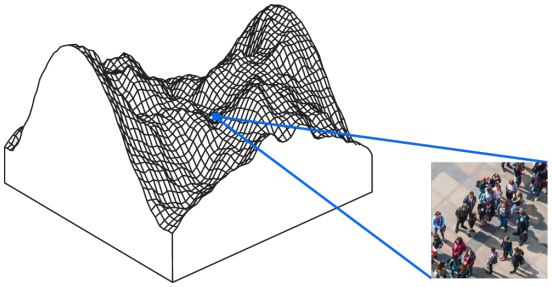
2.6.5. Traducción Metodológica: Del Flujo Económico al Cruce Textual (Clústeres vs. CAME) 65

2.6.6. Propuesta de Evaluación y Puntuación para el Cruce de Textos 65

2.7. Resultados contexto territorial **66**

2.7.1. Modelación Matemática: Ajuste RAS, Inversa de Leontief y Coeficientes de Rasmussen (30 Retos CAME) 68
2.7.2. Síntesis de resultados: matrices de incidencia a CAME, coeficientes técnicos RAS e inversa de Leontief (30 retos) 69
2.7.3. Construcción de los bordes marginales (push y pull) 71
2.7.4. Cálculo del denominador común de Rasmussen 73
2.7.5. Poder de Dispersión (Pull, lectura por columnas) 74
2.7.6. Sensibilidad de Dispersión (push, lectura por filas) 75
2.8. Ruta de Priorización Territorial y Articulación Ecosistémica 77
2.8.1. Jerarquización Estructural y Rol Ecosistémico de los Clústeres 78
2.8.2. Lectura del Panel A (plano cartesiano de dispersión de Rasmussen) 80
2.8.3. Lectura del Panel B (mapa de calor de intensidad clúster vs. 4 áreas CAME) 81
2.9. Complejidad de capacidades en clúster 81
2.9.1. Matriz de complejidad de capacidades en clúster 82
2.9.2. Índice de sofisticación 85
2.9.3. Índice % Alta + Media 86
2.9.4. Complejidad por clúster 87
Aviso sobre el uso de inteligencia artificial 90
Nuestras fuentes 90

Introducción



El presente informe analiza las capacidades de innovación, los sectores productivos y los retos territoriales de Medellín y Antioquia. Su objetivo es establecer una ruta de trabajo que conecte la base de conocimiento científico con el desarrollo económico y social de la región. Este ejercicio analítico es relevante para el territorio durante su transición hacia la consolidación como Distrito Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación, ya que propone un modelo de priorización de inversiones basado en métricas cuantificables. Mediante el cruce de los dominios de conocimiento de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI) con la clasificación industrial estándar global (GICS), el documento identifica las ventajas competitivas instaladas y las brechas estructurales del ecosistema para orientar la asignación de recursos corporativos y públicos.

Los resultados del análisis agrupan el tejido productivo en seis conglomerados sectoriales y exponen una asimetría en el ecosistema regional: el territorio genera conocimiento científico, pero registra un déficit en la traducción de dicha ciencia hacia tecnologías, patentes y bienes transables. La evaluación de madurez y dinamismo indica que los grupos de “Hábitat Sostenible y Estilo de Vida”, “Manufactura Avanzada y Materiales” y “Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos” operan como líderes del mercado con tracción comercial probada. Por otro lado, áreas con un acervo de conocimiento superior, como “Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida”, funcionan como reservas científicas con baja integración de mercado, mientras que “Agroindustria” y “Energía” muestran un aislamiento funcional que limita su encadenamiento en la red productiva.

A partir de este diagnóstico, las decisiones estratégicas exigen revisar la financiación de iniciativas aisladas para adoptar un modelo de interdependencia sectorial. La estrategia requiere posicionar “Habitat Sostenible”, a la “Economía Digital” y la “Manufactura Avanzada” como infraestructuras habilitadoras transversales para modernizar las empresas, cumplir metas de descarbonización y solucionar los retos operativos del territorio. Para ejecutar este redireccionamiento, las acciones posteriores se focalizan en aplicar las directrices del modelo CAME que incluye restos territoriales, priorizando la Compra Pública de Innovación para validar tecnologías locales utilizando al sector público como cliente principal. De forma complementaria, se requiere rediseñar los esquemas de cofinanciación para orientar la investigación y desarrollo (I+D) hacia problemas de la industria, retener talento técnico y reconvertir activos físicos, como la red hospitalaria y los sitios de disposición de residuos, en laboratorios vivos para el desarrollo clínico y biotecnológico.

1. Capítulo: Marco Conceptual

1.1 Defininiciones

1.1.1 Capacidades de Innovación según el Marco OMPI

Las capacidades de innovación, conforme a la conceptualización formal de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI), se definen como la aptitud demostrada que poseen las economías y organizaciones para estructurar ventajas competitivas sostenibles en campos de conocimiento e innovación específicos. Estas capacidades constituyen los pilares fundamentales que determinan la fortaleza de un ecosistema de innovación y permiten identificar tanto las áreas de excelencia relativa como los vacíos estructurales que obstaculizan el desarrollo económico.

Al evaluarlas, es posible mapear con claridad dónde existen fortalezas científicas y dónde se detectan vacíos técnicos. Por ejemplo, permiten entender si una región solo ensambla piezas importadas o si realmente domina el diseño industrial tras la tecnología.

Para medir este fenómeno, el modelo de la OMPI rastrea 2.508 campos de conocimiento entre los años 2001 y 2023. Esta muestra masiva permite construir una radiografía precisa de las transformaciones económicas a escala planetaria (OMPI, 2026).

La metodología organiza estos campos en cuatro grandes dimensiones que cubren todo el ciclo del conocimiento. Dichas dimensiones son Ciencia, Tecnología, Emprendimiento y Producción.

Estas cuatro dimensiones que componen el panorama global de la innovación se operacionalizan a través de indicadores y fuentes de información estandarizadas:

- **Dimensión de Ciencia:** Comprende 628 campos dedicados a la investigación fundamental y la generación de conocimiento primario en disciplinas como la física, la biología, la química y las ciencias sociales, cuya actividad se evalúa mediante publicaciones científicas de alto impacto.
- **Dimensión de Tecnología:** Abarca 480 campos enfocados en la investigación y desarrollo (I+D) aplicado para la creación de soluciones prácticas y prototipos, medidos a través de las primeras solicitudes de familias de patentes internacionales con protección PCT.
- **Dimensión de Emprendimiento:** Integra 538 campos orientados a la comercialización, el desarrollo de modelos operativos y la transferencia de tecnología al mercado, cuya intensidad y diversificación se rastrean mediante el registro de marcas consolidadas bajo la clasificación Niza.
- **Dimensión de Producción:** Reúne 862 campos que reflejan la capacidad de fabricación avanzada, la gestión de cadenas de suministro y la traslación de innovaciones al aparato productivo, evaluados mediante las exportaciones de bienes manufacturados de la base de datos UN Comtrade.

1.1.2 Significancia e Indicadores Metodológicos del Modelo de Capacidades de Innovación de la OMPI

La significancia analítica de este marco radica en su capacidad para evaluar la sofisticación, la complejidad y la densidad de las conexiones interdimensionales dentro de un ecosistema económico, para generar, absorber, difundir y monetizar el conocimiento.

La metodología incorpora los principios de la complejidad económica para cuantificar el grado de sofisticación e interdependencia de las capacidades en un territorio. Las capacidades de alta complejidad, tales como como la biotecnología avanzada, la computación cuántica o la inteligencia artificial, presentan una elevada interdependencia y no pueden desarrollarse de forma aislada o de manera artificial; requieren la presencia previa de un ecosistema diversificado y de una red densa de competencias e instituciones interconectadas (OMPI, 2026).

Mediante el uso de métricas de especialización absoluta, especialización relativa (ventajas comparativas reveladas), afinidad y evaluación del potencial no explotado, el modelo de la OMPI ofrece una radiografía rigurosa de las fortalezas estructurales, los cuellos de botella en la transferencia de conocimiento y las oportunidades de diversificación estratégica de cada economía.

Para llevar a cabo el análisis estructurado del presente estudio, se usarán algunas defincciones del conjunto de indicadores clave que establece la OMPI sobre capacidadesde de innovación junto con definiciones metedológicas propias:

- **Especialización Absoluta y Relativa:** Evalúa el grado en que distintas capacidades comparten conocimientos, competencias o infraestructuras, lo que determina la facilidad con la que un ecosistema puede diversificarse hacia nuevos campos de innovación.
- **Afinidad:** Abarca 480 campos enfocados en la investigación y desarrollo (I+D) aplicado para la creación de soluciones prácticas y prototipos, medidos a través de las primeras solicitudes de familias de patentes internacionales con protección PCT.
- **Potencial de Innovación y Potencial no Explotado:** El potencial cuantifica la producción esperada de una economía en un campo determinado con base en su desempeño en áreas conexas; el potencial no explotado mide la brecha entre esa capacidad teórica y la producción real observada. A nivel global, las capacidades tecnológicas presentan el mayor cuello de botella, donde únicamente el 10 % de las economías aprovechan plenamente su potencial de patentamiento, acumulando un déficit de 339.000 innovaciones tecnológicas complejas no realizadas al año.
- **Diversificación y Especialización Estratégica:** Representan el proceso deliberado de ampliar la cobertura de campos (diversidad) y elevar la sofisticación (complejidad) de las capacidades, evitando la trampa de dependencia de la trayectoria que condena a los sistemas menos desarrollados a acumular solo competencias de bajo valor.
- **Relevancia:** La relevancia mide la importancia de la contribución de territorio a la innovación global y si dicha contribución se corresponde con el tamaño de su economía. El indicador principal es su participación en la producción global de innovación, promediada en Ciencia, Tecnología, Emprendimiento y Producción, en comparación con su participación en el PIB y la población mundiales.
- **Diversidad:** La diversidad mide la amplitud (cuántas capaciades se tienen) de la participación de una economía en los campos de la innovación a nivel mundial. El principal indicador es su proporción de campos con capacidad activa, desglosados en Ciencia, Tecnología, Emprendimiento y Producción. En el caso local y en relación con el conglomerado de capaciadades de innovación a nivel global, Colombia domina el 9,4 % de todas las tecnologías, el 7,0 % en poducción, el 16 % de toda la ciencia y el 9,8 % de todos los campos del emprendimiento.
- **Sofisticación:** La sofisticación analiza la calidad de las capacidades de innovación de un territorio, no solo la cantidad de campos en los que opera, sino también el grado de avance de estos. En este marco, la

sofisticación se mide a través de la complejidad.

- **Complejidad:** Es la rareza y la intensidad de conocimiento de un campo, según la cantidad de economías capaces de producirlo. Cada dominio se clasifica en uno de tres niveles: Alto, Medio o Bajo, según su complejidad en relación con todos los campos a nivel mundial. Es un índice integrado que se calcula considerando el potencial de diversificación de las capacidades junto el nivel de desarrollo económico de las economías capaces de producirlo; su tamaño poblacional y el nivel de sofisticación de esas capacidades.
- **Densidad:** Cuantas capacidades están contenidas en un dominio. Este indicador es calculado por la OMPI pero depende de la proximidad. Para el presente estudio junto con la sofisticación, servirá para complementar el cálculo de la complejidad.

1.1.3 Transición metodológica hacia la escala territorial: Contexto territorial de Antioquia y Medellín

El marco de la OMPI ofrece una estructura firme para leer la innovación mundial con datos estandarizados. Ofrece un mapa general sobre cómo se mueven las grandes potencias. Sin embargo, los promedios nacionales suelen ocultar realidades locales. Entender el desarrollo económico requiere bajar esa mirada macro hacia el terreno de las ciudades y departamentos.

Analizar un territorio concreto ayuda a verificar si sus investigadores e instituciones están conectados con las exigencias del mercado global. Permite medir el impacto real de las universidades locales en el entorno económico (OMPI, 2026).

Al adaptar este marco metodológico al entorno regional resulta en un insumo indispensable para diseñar políticas públicas de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTI). De este modo, los incentivos gubernamentales se ajustan a las capacidades reales de la región y no a expectativas abstractas (OMPI, 2026; RutaN, 2026b).

El diagnóstico de Colombia entre 2010 y 2024 se basó en la adaptación del cálculo de índices de Ventajas Comparativas Reveladas (Índice de Balassa) abarcando 985.012 registros de exportaciones, 36.913 de patentes (patentes PCT e inventores residentes), 212.000 de marcas consolidadas internacionalmente (Clasificación Niza) y 95.000 artículos científicos de alto impacto en Scopus (publicaciones en el top 10 % de mayor citación). Los datos ubican al país en el puesto 72 de 193 economías globales, con un nivel de sofisticación del 40 % y el 10º en América Latina y el 18º en su grupo de ingreso medio-alto.

Esta estructura presenta una marcada asimetría. El 64 % de las capacidades nacionales son de baja sofisticación (impulsadas por alimentos, bebidas, tabaco con 16 %, ciencias sociales con 13 % y procesamiento agropecuario con 7,7 %), el 24 % se ubica en sofisticación media y únicamente el 12 % alcanza una alta sofisticación internacional.

A escala regional, Antioquia y Medellín suman 153 capacidades identificadas. Al igual que el resto del país, exhibiendo una correlación directa con el diagnóstico nacional al evidenciar una ruptura estructural entre sus capacidades científicas y tecnológicas con respecto a su desarrollo productivo exportador. Las exportaciones locales siguen concentradas en banano, café, flores y productos textiles. Mientras tanto, los avances científicos locales en física, matemáticas y ciencias médicas no logran transformarse en bienes industriales de alto valor.

El seguimiento realizado entre 2018 y 2024 mediante la plataforma ScienTI y el centro SCORE revela que la principal brecha de la ciudad frente a Bogotá radica en la escala y no en la intensidad científica. En 2024, la ciudad cuenta con 2.945 investigadores activos frente a los 6.533 de Bogotá; logrando una productividad bibliográfica por investigador de 0,70, prácticamente convergente con el 0,72 de la capital nacional (RutaN, 2026b)

Así mismo, Medellín destaca positivamente frente a Bogotá en articulación interna. Registra mayor interdisciplinariedad (34,0 % frente a 32,9 %), continuidad de proyectos (5,47 frente a 5,39) y en la proporción de investigadores que combinan simultáneamente productos científicos y tecnológicos (47,7 % frente a 46,0 %), manteniendo intervalos medios reducidos hacia la primera producción científica (6,76 años) y tecnológica

(5,85 años). No obstante, la ciudad conserva márgenes de mejora en inserción institucional (1,26 instituciones por investigador frente a 1,36) y colaboración científica (40,7 frente a 48,7). Para superar la desconexión entre la base científica y la producción exportadora, la agenda regional requiere actualizar los modelos de cofinanciación, focalizando los incentivos en proyectos que transformen los activos comerciales en patentes dentro del rango de vecindad tecnológica (COI) para atraer inversión extranjera directa de alto valor agregado (RutaN, 2026b).

1.1.4 Estándar GICS y Clasificación de Sectores Industriales

Para analizar la estructura empresarial y la orientación productiva del territorio de manera estandarizada, se recurre al Estándar de Clasificación Industrial Global (GICS®, por sus siglas en inglés). El estándar GICS constituye una taxonomía jerárquica que categoriza a las empresas y actividades económicas en sectores, grupos industriales, industrias y subindustrias. La utilización de esta estructura estandarizada permite homologar las actividades del sector privado, evaluar la especialización de los mercados locales y facilitar la comparación intertemporal e internacional de las dinámicas de inversión (MSCI, 2026).

El estándar de clasificación GICS fue desarrollado en 1999 de manera conjunta por MSCI y S&P Dow Jones Indices. Su propósito principal fue ordenar los mercados financieros internacionales bajo una misma taxonomía. A diferencia de las clasificaciones tradicionales enfocadas exclusivamente en los procesos de fabricación primaria, el estándar GICS se fundamenta en una orientación hacia la demanda del mercado (market demand-oriented), lo que permite capturar de manera precisa el valor de las economías basadas en servicios, tecnologías y bienes discrecionales. El sistema clasifica a cada empresa en una única categoría a partir de sus principales fuentes de ingresos (>60 % del total), sus ganancias y la percepción del mercado.

El sistema organiza a las empresas en cuatro niveles jerárquicos: 11 Sectores, 25 Grupos Industriales, 74 Industrias y 163 Subindustrias. Esta división permite analizar desde grandes tendencias económicas hasta nichos específicos de mercado.

En la arquitectura analítica de este estudio, el segundo nivel jerárquico de GICS, correspondiente a los 25 Grupos Industriales, se utiliza como la estructura de agrupamiento principal para mapear y comparar la actividad económica. Este conjunto de 25 Grupos Industriales que abarca categorías como Energía, Materiales, Bienes de Capital, Servicios Comerciales y Profesionales, Software y Servicios, Servicios de Telecomunicaciones y Medios y Entretenimiento, entre otros; proporcionando los contenedores sectoriales para realizar la homologación de los dominios de la OMPI. Cada Grupo Industrial posee una definición funcional precisa que delimita su alcance; por ejemplo, Medios y Entretenimiento (GICS 5020) comprende la creación, producción y distribución de contenidos audiovisuales e interactivos, diferenciándose operativamente de Servicios de Telecomunicaciones (GICS 5010), centrado en la provisión de redes de conectividad y transmisión de voz y datos (MSCI, 2026).

GICS rompe con el esquema tradicional centrado solo en los procesos de fabricación. Su arquitectura responde al comportamiento de la demanda y a cómo los clientes consumen bienes o servicios. Esta visión clasifica actividades según su posición en el mercado, agrupando categorías como Consumo Discrecional o Consumo Básico. Además, otorga autonomía a sectores estratégicos como Salud, Tecnologías de la Información y Bienes Raíces.

1.1.5 Concepto Metodológico de Grupo Industrial

En el ámbito de la planificación económica y el análisis de competitividad, un sector económico se define como el conjunto de unidades de producción, comercialización o prestación de servicios que comparten procesos tecnológicos homogéneos, mercados de destino, estructuras de costos o requerimientos de insumos similares. La delimitación sectorial resulta indispensable para desagregar la actividad productiva de un territorio, comprender la dinámica de los mercados y evaluar la capacidad de absorción de nuevas tecnologías

e innovaciones en el tejido empresarial.

Bajo el marco metodológico GICS, un sector económico se define y operacionaliza como la categoría única de negocio de una organización, propagando dicha clasificación hacia la totalidad de sus instrumentos financieros y títulos de renta variable. La unidad fundamental de análisis es la entidad corporativa, cuya clasificación responde a su actividad económica principal, medida sobre todo por el origen de sus ingresos brutos anuales.

La regla de clasificación cuantitativa establece que una empresa se asigna inicialmente a la Sub-Industria que representa la actividad comercial responsable de más del 60 % de sus ingresos totales. Cuando ninguna actividad alcanza el umbral del 60 %, se utiliza la actividad que genera la mayor participación (al menos el 50 %) tanto de las ventas como de las utilidades. Aquellas organizaciones con participaciones significativamente diversificadas en tres o más sectores sin una línea dominante se clasifican en Conglomerados Industriales o en Holdings Multisectoriales. Para preservar la estabilidad del sistema y evitar fluctuaciones temporales, los reasentamientos de clasificación exigen que una nueva actividad represente de manera sostenida más del 60 % de los ingresos.

Dentro del enfoque GICS, al determinar cuantitativamente a qué Sub-Industria pertenece a una organización en particular, el Grupo Industrial queda definido automáticamente por herencia y jerarquía estructural. Para el marco del presente análisis, el Grupo Industrial se presenta como unidad de clasificación dado que ofrece un equilibrio entre agregación y granularidad: los 11 Sectores resultan demasiado generales para capturar dinámicas tecnológicas específicas, mientras que las 74 Industrias o 163 Subindustrias atomizan en exceso el análisis.

En otras palabras, un Grupo Industrial es una categoría taxonómica formal, predefinida a partir de la homogeneidad de las líneas de negocio y las fuentes de ingresos corporativas de las empresas que lo componen. Esta escala intermedia permite homologar y cruzar de manera limpia, directa y manejable las estructuras productivas y de mercado con los dominios de conocimiento definidos en el marco de la OMPI (ciencia, tecnología, emprendimiento y producción). En síntesis, el Sector ofrece una visión macroeconómica general, el Grupo Industrial establece agrupaciones temáticas intermedias y la Industria desagrega la actividad económica hacia mercados específicos.

1.1.6 Cruce Metodológico entre Capacidades de Innovación (OMPI) y Grupos Industriales (GICS)

El cruce matricial entre las capacidades de innovación del marco OMPI y la clasificación industrial GICS constituye el puente técnico que permite conectar el conocimiento científico y tecnológico con la estructura empresarial para identificar oportunidades de sofisticación económica.

Este modelo adopta los 25 Grupos Industriales de GICS como las filas estructurantes de la matriz, superponiendo sobre cada grupo empresarial sus dominios equivalentes en las cuatro dimensiones de la OMPI: ciencia, tecnología, emprendimiento y producción.

La metodología realiza ajustes para reflejar la realidad del mercado. Para garantizar una homologación técnica entre las capacidades del conocimiento y los mercados, el marco efectúa reubicaciones fundamentales. Se destaca el traslado del dominio OMPI “Productos vegetales y transformación de alimentos” (112 campos) desde el grupo de Materiales (GICS 1510) hacia el grupo de Alimentos, Bebidas y Tabaco (GICS 3020), alineando los cultivos y el procesamiento agropecuario con su entorno comercial real. Asimismo, se incorporan de manera explícita el dominio “Audiovisual” (7 campos tecnológicos) en el grupo de Medios y Entretenimiento (GICS 5020). Este cruce permite a los comités de planeación económica mapear la intensidad del conocimiento, medir la afinidad tecnológica, diagnosticar brechas y detectar el potencial no explotado dentro de cada sector industrial.

Mediante este cruce temático es posible evaluar:

- La afinidad tecnológica existente entre la base científica local y la oferta industrial del territorio. .
- Las brechas de capacidad y el potencial no explotado por sector, identificando en qué áreas productivas existen bases de investigación que no se han traducido en patentes o emprendimientos de alto valor.
- Las rutas óptimas para promover una diversificación inteligente, maximizando el retorno de la inversión pública y privada en Ciencia, Tecnología e Innovación (CTI).

1.1.7 Concepto de Clúster como aglomeración integrada de Capacidades

Los clústeres se definen como un grupo de actividades de producción concentradas en un mismo espacio, especializadas en una o más industrias. Autores como Cooke (2001) y Sutikno y Suliswanto (2015) comparten la opinión de Belussi (2015) de que los clústeres son un sistema local de aprendizaje que se fundamenta en un modelo de innovación constante y gradual, que promueve el crecimiento económico de una región (DNP, 2024).

Su valor real radica en la red de relaciones que se crea en el territorio. Esta cercanía facilita el intercambio de conocimientos y acelera los proyectos entre el sector público y el privado.

El núcleo del clúster depende de la densidad de enlaces entre la investigación, las patentes, las marcas y las exportaciones. Cuando estas cuatro dimensiones conversan, las ideas circulan con mayor rapidez.

Un clúster no representa una simple agrupación física de firmas pertenecientes a una misma industria, sino un ecosistema donde convergen las competencias locales.

La esencia del clúster reside en la densidad de sus conexiones interdimensionales entre la ciencia, la tecnología, el emprendimiento y la producción. Esta red de conexiones facilita la transferencia acelerada de conocimientos, reduce los costos de transacción en los procesos de innovación y permite la co-evolución de las capacidades locales sin necesidad de adelantar o describir las tipologías específicas de clústeres del territorio (OMPI, 2026).

Para el marco del presente trabajo, el concepto de Clúster se define como la agrupación analítica posterior y emergente, construida empíricamente a partir de la identificación de relaciones, densidades e interdependencias funcionales entre las capacidades de innovación OMPI y los grupos industriales GICS.

Los clústeres no constituyen divisiones administrativas o sectores económicos rígidos, sino configuraciones territoriales dinámicas que emergen cuando múltiples grupos industriales comparten una base común de capacidades científicas, tecnológicas, empresariales y productivas de alta afinidad (proximidad).

La lógica metodológica de la matriz de cruce “capacidades de innovación OMPI × grupos industriales GICS” consiste en superponer el mapa de activos de conocimiento sobre la estructura de actividades económicas estandarizadas. Este análisis busca identificar de manera sistemática:

- Qué capacidades de conocimiento (científico, tecnológico, empresarial y productivo) están asociadas o respaldan a cada grupo industrial específico.
- Cómo se distribuye la intensidad y la sofisticación tecnológica a lo largo de las distintas ramas de la economía territorial.
- Dónde existen brechas o desacoples estructurales entre la disponibilidad de capacidades de investigación y la capacidad de absorción del tejido industrial existente.

Al definir conceptualmente las capacidades de innovación de la OMPI, formalizar la taxonomía de los 25 Grupos Industriales GICS y fundamentar la lógica de su cruce analítico, este capítulo proporciona el marco metodológico sobre el cual se sustenta la siguiente fase del estudio.

En el capítulo posterior, se utilizarán las relaciones de afinidad, densidad y sofisticación derivadas de la

matriz de cruce de homologación para agrupar los grupos industriales en clústeres territoriales, permitiendo visualizar la articulación real entre el conocimiento y la producción en Antioquia.

2. Identificación de Clústeres

2.1 Homologación Grupos Industriales GICs Vs Categorías OMPI (Capacidades)

Las capacidades de innovación, conforme a la conceptualización formal de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI), se definen como la aptitud demostrada que poseen

La construcción de los clústeres parte de dos sistemas de clasificación con lógicas y propósitos distintos. Como se ha señalado el estándar GICS, agrupa a las empresas en 25 grupos industriales con base en su actividad económica principal y su fuente predominante de ingresos. Es un esquema orientado al mercado bursátil y a la comparabilidad financiera, y cada grupo está acompañado de una descripción textual que detalla las industrias y subindustrias que lo componen. El segundo es el listado de capacidades OMPI para Medellín-Antioquia como región, compuesto por 33 categorías de campos de conocimiento y tecnología, derivadas de la clasificación empleada para organizar patentes e invenciones según su dominio técnico-científico. Este esquema está orientado a las capacidades de generación de conocimiento, no a la actividad comercial.

Las taxonomías de dominios de la OMPI y de grupos industriales GICS difieren en su fundamento: la primera se basa en criterios disciplinares y tecnológicos (qué conocimiento se aplica y se produce), mientras que la segunda responde a criterios económico-financieros (qué se vende y de dónde provienen los ingresos). Como ninguna fue diseñada para corresponderse con la otra, no existe una tabla de correspondencia oficial que las vincule, por lo que su correspondencia debe entenderse como una construcción analítica y no como un dato preexistente.

Este problema es análogo al de la interoperabilidad entre sistemas de clasificación (Crosswalks), ampliamente documentado en la literatura sobre concordancias entre clasificaciones industriales y tecnológicas. Ejemplo: Un sistema de clasificación cruzada o Crosswalk (también conocido como tabla de correspondencias o mapeo de datos) es una herramienta de traducción de datos que establece equivalencias entre dos sistemas de clasificación o esquemas de metadatos diferentes, como se puede observar en la Tabla 1. Su función principal es permitir la interoperabilidad, de modo que la información recopilada bajo un estándar específico pueda ser entendida, comparada o fusionada con datos estructurados bajo un estándar distinto.

Tabla 1: Equivalencia de códigos entre Sistema A y Sistema B. Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

Código en Sistema A	Descripción Sistema A	Código equivalente en Sistema B	Descripción Sistema B
01	Trigo	A-120	Cereales de grano
02	Cebada	A-120	Cereales de grano

La metodología de asignación se fundamenta en un mapeo semántico de taxonomías cruzadas, aplicando principios de evaluación multicriterio para vincular la estructura económica de las cadenas de valor GICS con los dominios de innovación y patentes OMPI. Científicamente, este proceso se respalda en los modelos de concordancia tecnología-industria (como la matriz metodológica desarrollada por Ulrich Schmoch para la OMPI), los cuales postulan que la correspondencia entre la actividad comercial y la base de conocimiento

no es lineal, sino matricial e interdependiente. Bajo esta premisa de proximidad tecnológica, se realizó una descomposición analítica de cada grupo industrial; evaluando sus insumos, procesos de manufactura, intensidad técnica y servicios finales para emparejarlos con múltiples sectores OMPI.

La matriz de concordancia desarrollada por Ulrich Schmoch (adoptada por la OMPI en 2008) demuestra que las patentes y el conocimiento no se alinean de forma unívoca con las industrias, lo cual se evidencia claramente al analizar un clúster económico como "Equipos y servicios de atención médica" (GICS). Bajo una clasificación tradicional o lineal, este grupo industrial se asignaría exclusivamente al dominio tecnológico de Tecnología Médica (OMPI). Sin embargo, el modelo metodológico de Schmoch desagrega la base de conocimiento empírica requerida para manufacturar bienes complejos, como un escáner de resonancia magnética o un marcapasos, revelando una convergencia obligatoria de múltiples campos. La viabilidad de este sector depende de patentes y desarrollos en Medición y Sensores (campos de la computación), Sistemas de Control (campos de la computación) y Química Macromolecular para plásticos y polímeros biocompatibles (campo de la química y la farmacéutica). Esto garantiza que la clasificación supere la simple equivalencia de productos y logre capturar todo el ecosistema subyacente de conocimiento, investigación e infraestructura científica que resulta indispensable para sostener la competitividad de cada clúster económico.

Teniendo en cuenta la anterior la homologación de los dominios OMPI con los grupos industriales GICS, se realizó con el objetivo de estandarizar la búsqueda de información exógena. Dado que las capacidades de innovación están asignadas a los dominios, por consiguiente, quedan asignadas a los diferentes grupos industriales GICS. Los clústeres se construyeron por asignaciones directas y por afinidad semántica entre las definiciones y naturaleza de cada grupo industrial, cabe resaltar que algunas capacidades son comunes entre diferentes clústeres identificados. A partir de diferentes metodologías, se busca confirmar esta asignación, bajo criterios de priorización sectorial.

Ante esta ausencia de un mapeo de referencia, se adopta un enfoque de análisis de contenido cualitativo técnica que permite hacer inferencias válidas y replicables a partir de textos mediante categorías definidas explícitamente. El procedimiento se estructura en las siguientes fases:

1. Unidad de análisis. Se toma como unidad la descripción textual de cada uno de los 25 grupos industriales GICS, y la definición de cada una de las 33 categorías OMPI, incluyendo su contenido implícito, es decir, los tipos de invención y de conocimiento técnico que típicamente abarca.
2. Extracción de indicadores de actividad. De cada descripción GICS se identifican las actividades concretas y observables que la caracterizan (por ejemplo, "fabricación de neumáticos", "desarrollo de terapias basadas en proteínas" o "generación eléctrica nuclear"). Este paso reduce la ambigüedad propia del lenguaje sectorial y traslada el análisis del nivel de la etiqueta industrial al nivel de la práctica productiva o de conocimiento, mediante una codificación abierta seguida de una codificación axial que agrupa actividades afines. .
3. Comparación semántica y criterio de correspondencia. Cada actividad identificada se contrasta con la definición de las categorías OMPI, aplicando como criterio de asignación el campo técnico o disciplinar que mejor responde a la pregunta "¿qué conocimiento se aplica en esta actividad?". La correspondencia se establece por afinidad de contenido (base científica, procesos y tecnologías involucradas) y no por identidad de denominación. .

Este enfoque presenta ventajas y limitaciones que conviene declarar. Su principal fortaleza es la transparencia y la trazabilidad: cada vínculo puede justificarse con evidencia textual y ser replicado o refutado. Sus limitaciones incluyen cierto grado de subjetividad interpretativa y la dependencia de la calidad y el nivel de detalle de las descripciones de origen. Aun así, frente a la inexistencia de un mapeo oficial, constituye una alternativa metodológicamente sólida para articular la lógica de mercado del GICS con la lógica de capacidades científico-tecnológicas de la OMPI, y sienta las bases para conformar clústeres que integren ambas dimensiones en el análisis del ecosistema de Medellín- Antioquia región.

Notas de apliación

Un grupo GICS puede mapear a varios sectores OMPI si cubre actividades técnicamente distintas. Ejemplo: "Bienes de consumo duraderos y prendas de vestir" → Hogar (electrodomésticos) + Ropa/Textiles (indumentaria).
Priorización de la actividad técnica/productiva sobre la comercial En "Distribución y venta minorista de productos básicos", se separa Salud (farmacias) de Agricultura y Alimentos (distribución de comida), en vez de meterlo todo en "Bienes de consumo" .Grupos muy diversificados recibieron múltiples sectores. En "Materiales" (GICS) es el caso más amplio: incluye química, cemento, empaques, minería y papel — cada uno con su propio sector OMPI Grupos puramente financieros/de servicios (bancos, seguros, servicios financieros) se asignaron a categorías OMPI de tipo administrativo/económico, dado que OMPI no tiene una categoría específica de "banca" — la más cercana conceptualmente es "Negocios y Economía" / "Gestión empresarial".

Notas de limitaciones

Esta asignación es un criterio interpretativo, no una tabla de correspondencia oficial ni validada por un tercero (ni GICS ni OMPI publican un cruce entre ambos esquemas). El resultado de esta homologación se usa para algo con consecuencias formales (encontrar información referenciada en documentos sectoriales GICs previamente elaborados). Se recomienda que, si se usare para otras homologaciones, se tenga primero un conocimiento del dominio específico, se revise las asignaciones, especialmente los casos "multi-sector" donde pueden primar decisiones de criterio propio.

2.2 Conformación conceptual de clústeres territoriales

El procedimiento para consolidar estos clústeres consistió en un análisis de convergencia tecno-económica, donde los cruces previos entre las cadenas de valor comerciales GICS y los dominios de conocimiento OMPI se agruparon según su densidad de interacciones y proximidad estructural.

En primer lugar, se identificó la superposición de dependencias tecnológicas; por ejemplo, al evidenciar que tanto el grupo de "Equipos de atención médica" como el de "Productos farmacéuticos" dependían críticamente de dominios OMPI compartidos como Biofarma, Ciencias de la Vida y Psicología, se fusionaron en un macrosector (Clúster) unificado.

Como se ha mencionado anteriormente, el marco Medellín-Antioquia región, se estimaron 153 capacidades de innovación, con sus respectivos dominios y dimensiones. Al clasificarlas por clústeres, se identificó que solo 150 quedaron asignadas como capacidades únicas, pues 3 de ellas, que pertenecían a diferentes dominios, fueron asignadas a un mismo clúster. Las 3 capacidades repetidas por dominio fueron las siguientes: Conservación de la biodiversidad y estrategias de gestión ecológica (Domino Ciencias Agrícolas y Ambientales), Infecciones virales y enfermedades asociadas en individuos inmunodeprimidos (Dominio Ciencias de la Vida) y Patogénesis y análisis genómico de enfermedades infecciosas (Dominio Ciencias Médicas y de la Salud).

Posteriormente, se asignó un nombre a estas agrupaciones que trasciende las clasificaciones industriales tradicionales para reflejar propuestas de valor orientadas a estrategias de especialización inteligente así:

- **Agroindustria, Alimentos y Nutrición:** Supera el concepto extractivo básico para integrar toda la cadena biológica, de comercialización y de salud del consumidor.
- **Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos:** Refleja la transversalidad de la infraestructura intangible y de datos que hoy soporta la competitividad de bancos, medios y telecomunicaciones.
- **Energía y sostenibilidad ambiental:** Asocia la generación tradicional de servicios públicos con la investigación en materias primas y ciencias ambientales, apuntando al imperativo de la transición ecológica.
- **Hábitat Sostenible y Estilo de vida:** Agrupa la gestión inmobiliaria, la construcción, los textiles y los

bienes de consumo, reconociendo que el entorno construido y la demanda de confort humano operan como un único circuito económico.

- **Manufactura avanzada y Materiales:** Fusiona el transporte, los bienes de capital, los semiconductores y la minería bajo el concepto de transformación física altamente intensiva en tecnología y ciencias exactas.
- **Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida:** Enfatiza la indivisibilidad contemporánea entre la instrumentación médica, la innovación farmacológica y la neurociencia.

La decisión de conformar seis clústeres, en lugar de siete u ocho, se fundamenta en criterios de agrupamiento y en la estructura de proximidad identificada en la matriz GICS-OMPI. Para determinar el número de grupos, se aplica un algoritmo de agrupamiento jerárquico y se evalúa el nivel de corte del dendrograma, considerando la estructura resultante y la coherencia de los grupos. Como criterio complementario, se emplea la "regla del codo" para identificar el punto a partir del cual aumentar el número de clústeres produce mejoras marginales en la medida de dispersión (varianza) seleccionada. Bajo estos criterios, la solución de seis clústeres se considera la más adecuada para representar la estructura de agrupamiento observada. Forzar un séptimo u octavo clúster obligaría a segmentar ecosistemas que son estructuralmente interdependientes (por ejemplo, separar artificialmente la automoción de la manufactura de materiales, o escindir los servicios financieros del bloque digital), generando subgrupos sin la masa crítica de innovación necesaria para justificar una categoría independiente.

A Continuación, se presenta la asignación por clústeres, de los sectores GICs y los componentes equivalentes a los dominios OMPI (que traen las capacidades asociadas) Ver Figuras de la 1 a la 6:

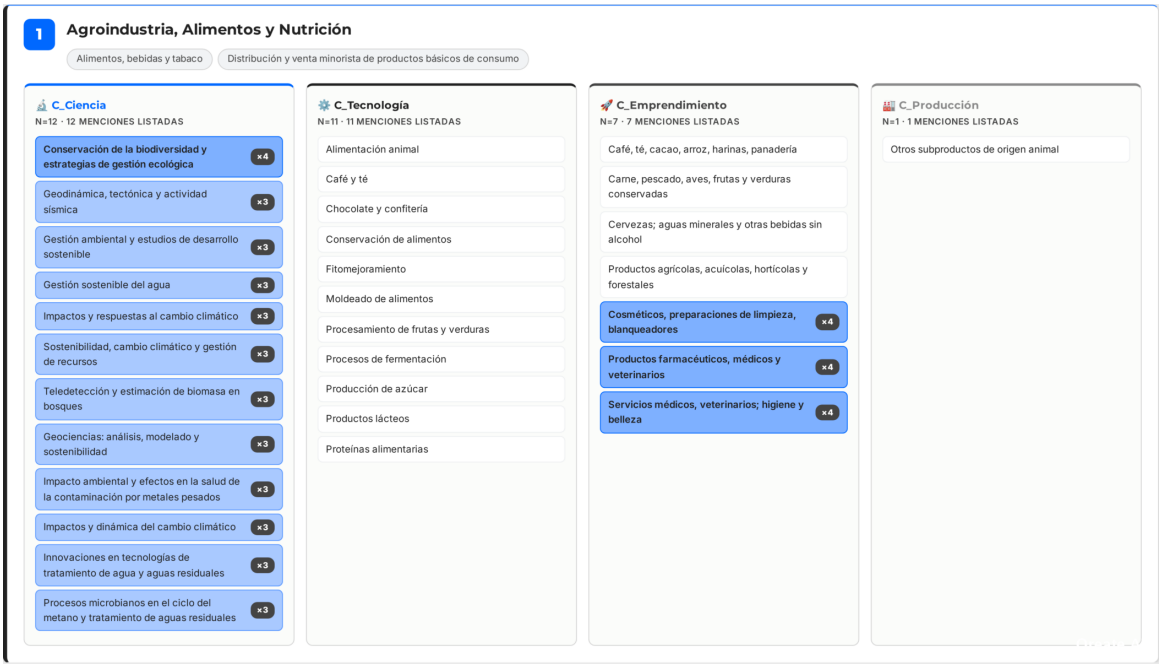


Figura 1: Panel de categorización clúster de**Agroindustria, Alimentos y Nutrición**, el cual clasifica sus Capaciadades de Innovación por dimensiones: Ciencia, Tecnología, Emprendimiento y Producción. Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026.

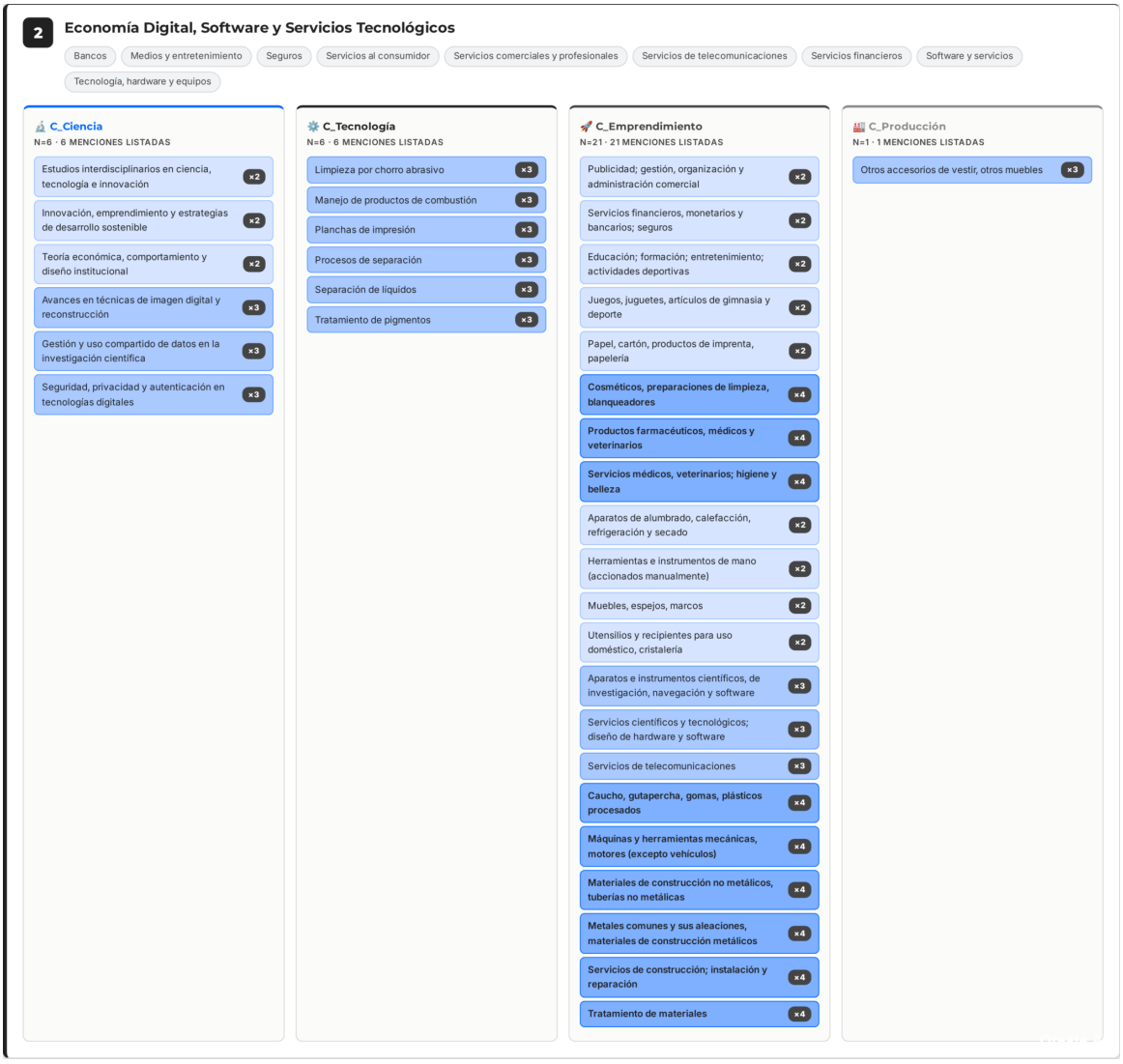


Figura 2: Panel de categorización clúster de **Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos**, el cual clasifica sus Capaciadades de Innovación por dimensiones: Ciencia, Tecnología, Emprendimiento y Producción. Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026.

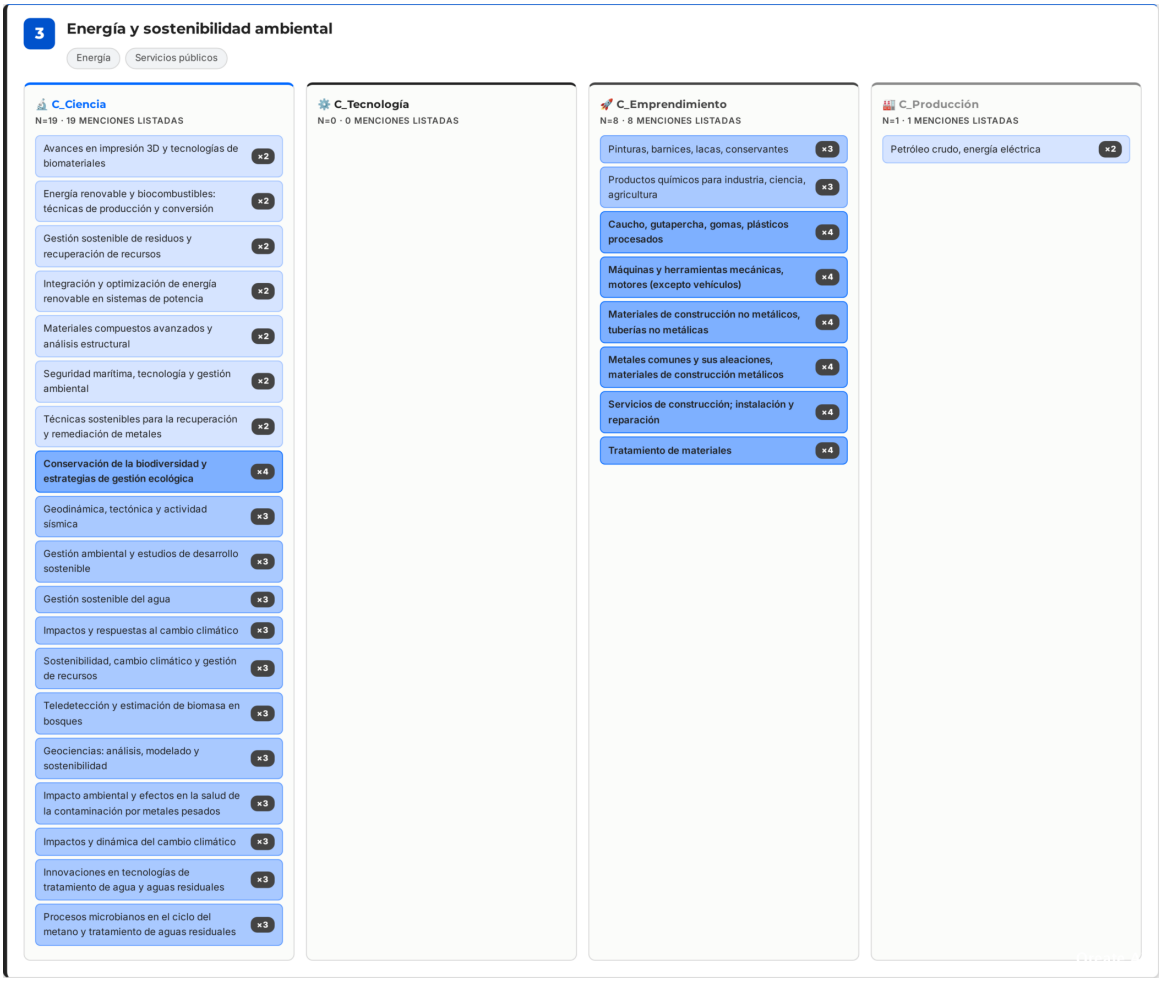


Figura 3: Panel de categorización clúster de **Energía y Sostenibilidad Ambiental**, el cual clasifica sus Capaciadades de Innovación por dimensiones: Ciencia, Tecnología, Emprendimiento y Producción. Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026.

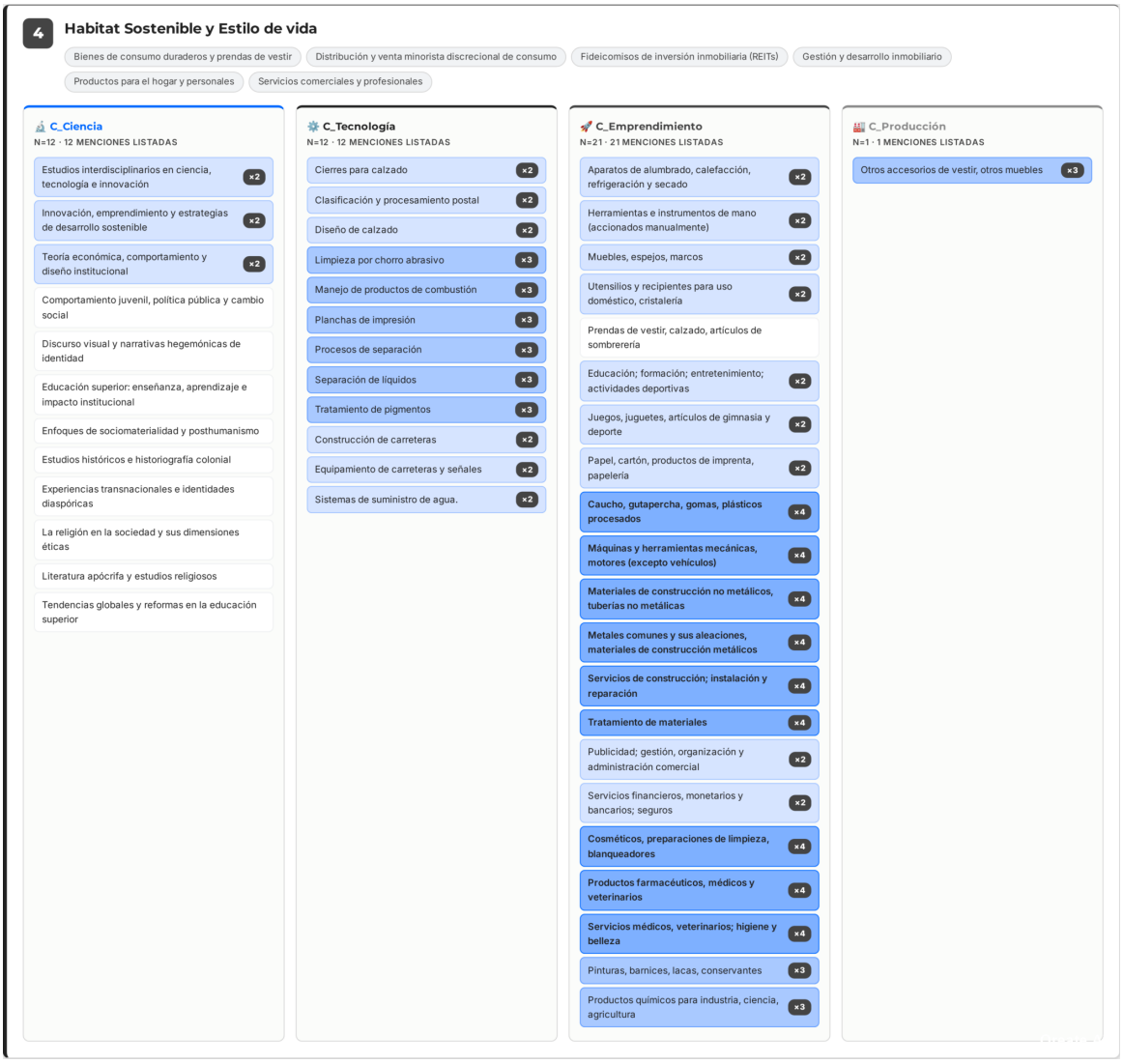


Figura 4: Panel de categorización clúster de **Hábitat Sostenible y Estilo de Vida**, el cual clasifica sus Capaciadades de Innovación por dimensiones: Ciencia, Tecnología, Emprendimiento y Producción. Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026.

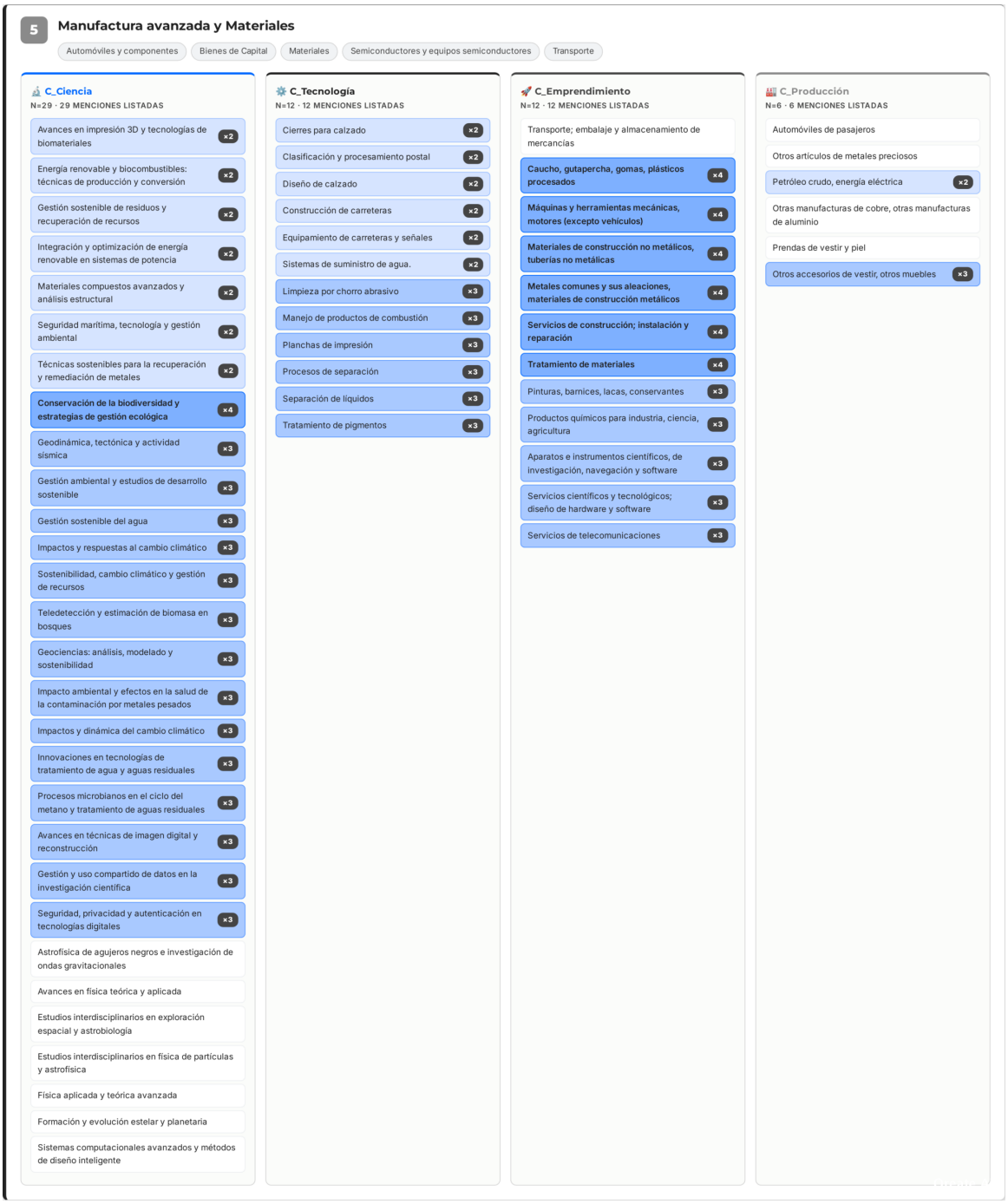
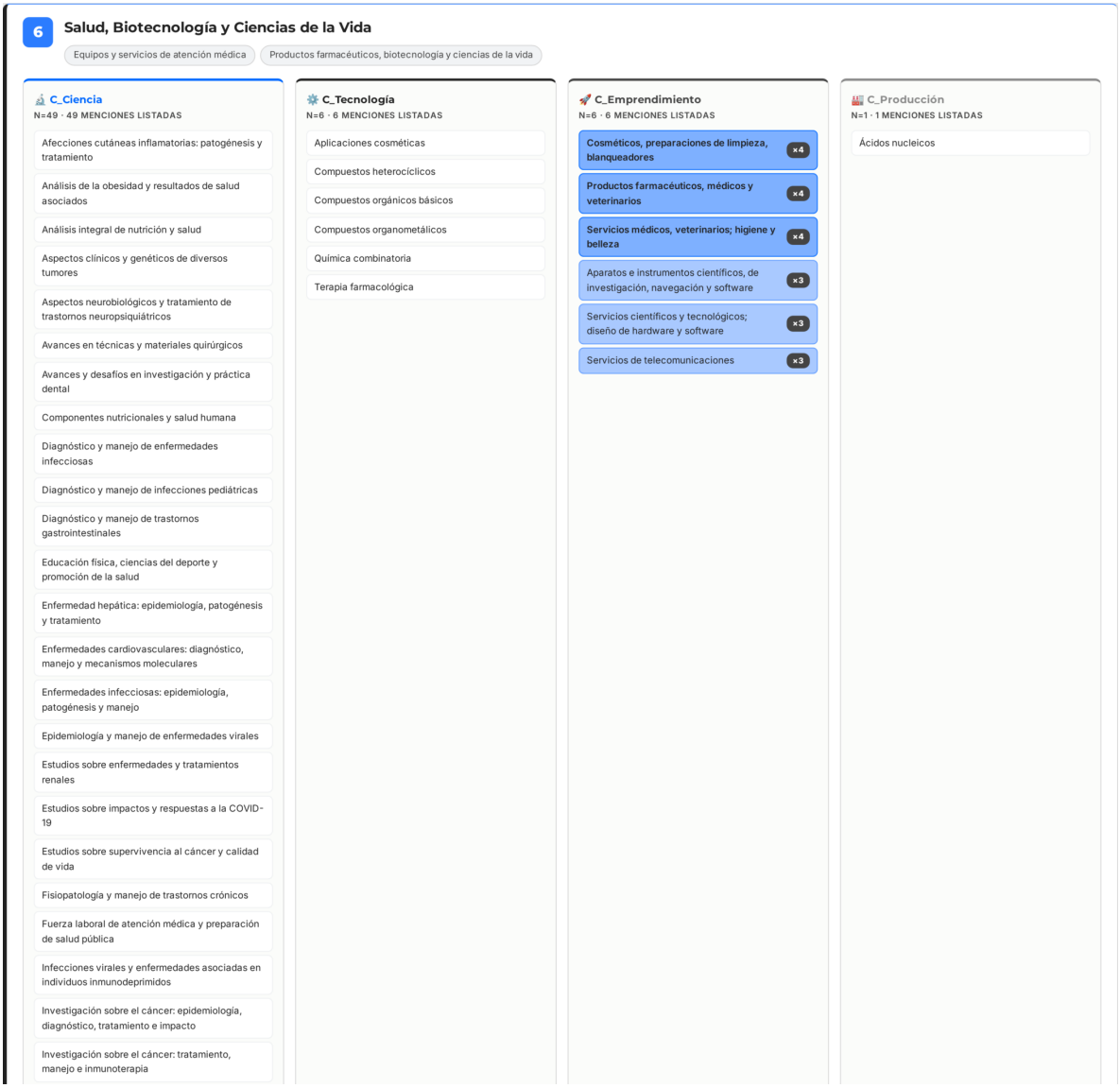


Figura 5: Panel de categorización clúster de **Manufactura Avanzada y Materiales, el cual** clasifica sus Capaciadades de Innovación por dimensiones: Ciencia, Tecnología, Emprendimiento y Producción. Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026.


6
Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida
Equipos y servicios de atención médica
Productos farmacéuticos, biotecnología y ciencias de la vida
C_Ciencia
N=49 · 49 MENCIONES LISTADAS
Afecciones cutáneas inflamatorias: patogénesis y tratamiento
Análisis de la obesidad y resultados de salud asociados
Análisis integral de nutrición y salud
Aspectos clínicos y genéticos de diversos tumores
Aspectos neurobiológicos y tratamiento de trastornos neuropsiquiátricos
Avances en técnicas y materiales quirúrgicos
Avances y desafíos en investigación y práctica dental
Componentes nutricionales y salud humana
Diagnóstico y manejo de enfermedades infecciosas
Diagnóstico y manejo de infecciones pediátricas
Diagnóstico y manejo de trastornos gastrointestinales
Educación física, ciencias del deporte y promoción de la salud
Enfermedad hepática: epidemiología, patogénesis y tratamiento
Enfermedades cardiovasculares: diagnóstico, manejo y mecanismos moleculares
Enfermedades infecciosas: epidemiología, patogénesis y manejo
Epidemiología y manejo de enfermedades virales
Estudios sobre enfermedades y tratamientos renales
Estudios sobre impactos y respuestas a la COVID-19
Estudios sobre supervivencia al cáncer y calidad de vida
Fisiopatología y manejo de trastornos crónicos
Fuerza laboral de atención médica y preparación de salud pública
Infecciones virales y enfermedades asociadas en individuos inmunodeprimidos
Investigación sobre el cáncer: epidemiología, diagnóstico, tratamiento e impacto
Investigación sobre el cáncer: tratamiento, manejo e inmunoterapia
C_Tecnología
N=6 · 6 MENCIONES LISTADAS
Aplicaciones cosméticas
Compuestos heterocíclicos
Compuestos orgánicos básicos
Compuestos organometálicos
Química combinatoria
Terapia farmacológica
C_Emprendimiento
N=6 · 6 MENCIONES LISTADAS
Cosméticos, preparaciones de limpieza, blanqueadores
×4
Productos farmacéuticos, médicos y veterinarios
×4
Servicios médicos, veterinarios; higiene y belleza
×4
Aparatos e instrumentos científicos, de investigación, navegación y software
×3
Servicios científicos y tecnológicos; diseño de hardware y software
×3
Servicios de telecomunicaciones
×3
C_Producción
N=1 · 1 MENCIONES LISTADAS
Ácidos nucleicos

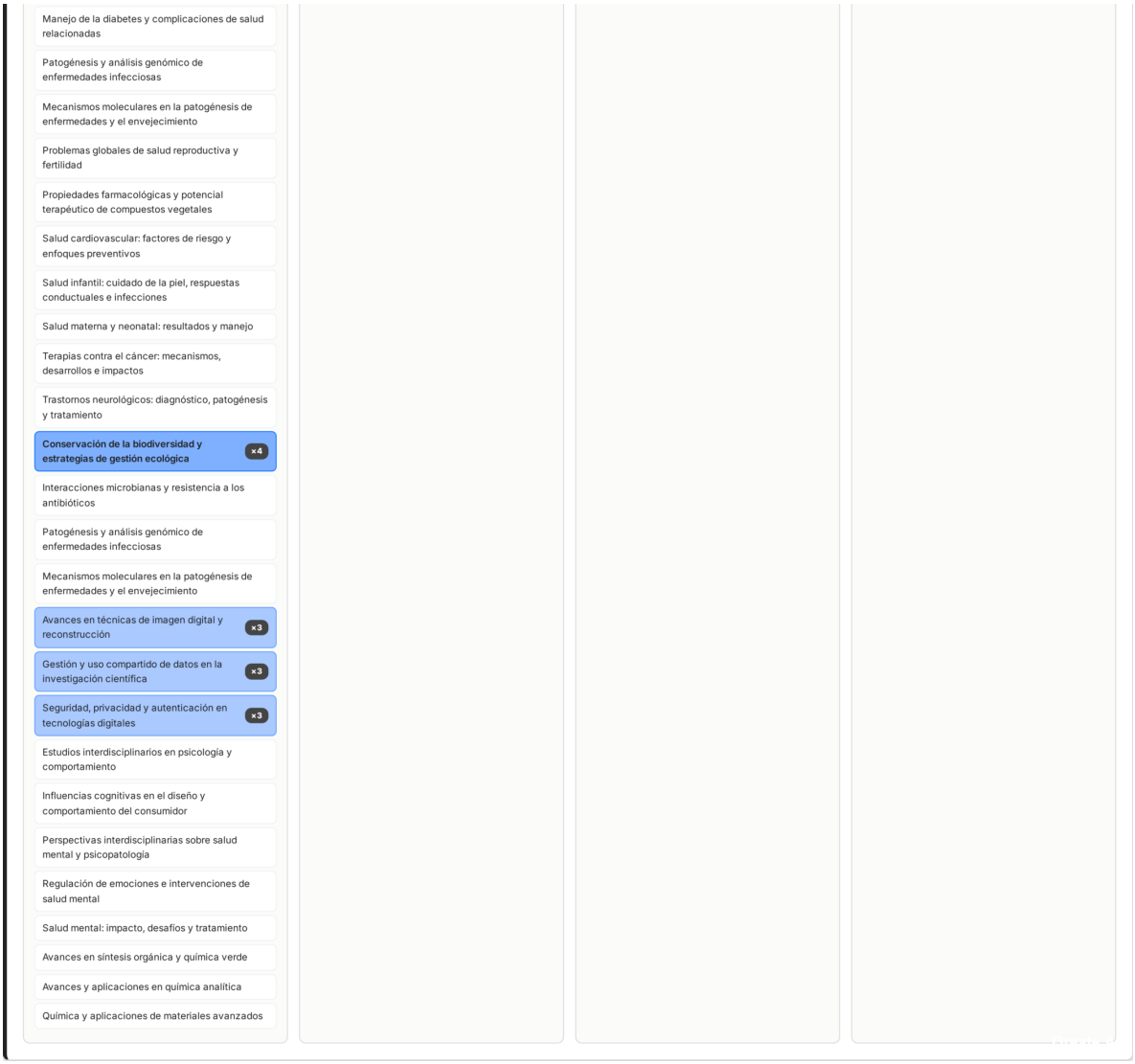


Figura 6: Panel de categorización clúster de **Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida**, el cual clasifica sus Capaciadades de Innovación por dimensiones: Ciencia, Tecnología, Emprendimiento y Producción. Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026.

2.2.1 Perfil de cada dimensión

El tablero organiza 6 clústeres y, para cada uno, sus Grupos Industriales GICS junto con cuatro dimensiones de capacidad. La lectura es por filas (de izquierda a derecha): cada clúster concentra un perfil propio de fortalezas científicas, emprendedoras, productivas y tecnológicas.

- **Ciencia (84 capacidades únicas):** es la dimensión más amplia y diversa. Concentra la mayor variedad temática, sobre todo en Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida (con diferencia el clúster con más capacidades científicas, N=49). Aun así, 25 líneas científicas se comparten entre clústeres, en especial el bloque ambiental/sostenibilidad.
- **Emprendimiento (29 únicas · 23 compartidas):** es la dimensión con mayor solapamiento relativo: casi 8 de cada 10 capacidades se repiten en varios clústeres. Refleja una base emprendedora transversal (químicos, materiales, servicios científico-tecnológicos, salud/cosmética) común a casi toda la matriz productiva.
- **Producción (8 únicas · solo 2 compartidas):** es la dimensión más específica y diferenciadora. Cada clúster tiene productos propios (petróleo/energía, automóviles, ácidos nucleicos, subproductos animales), con muy poca repetición.
- **Tecnología (29 únicas · 12 compartidas):** nivel intermedio de solapamiento, con un núcleo tecnológico común (procesos de separación, tratamiento de pigmentos, planchas de impresión, calzado y logística postal).

2.2.2 Capacidades más compartidas resaltadas en el tablero

- **Ambiente y sostenibilidad (Ciencia):** “Conservación de la biodiversidad y estrategias de gestión ecológica” aparece en 4 clústeres; todo el bloque de cambio climático, agua y geociencias se repite en 3. Es el hilo científico que conecta Agroindustria, Energía, Manufactura y Salud.
  “Productos farmacéuticos”
- **Base químico-industrial y de servicios (Emprendimiento):** “Cosméticos y limpieza”, “Productos farmacéuticos”, Caucho y plásticos”, “Máquinas y motores”, “Materiales de construcción” y “Tratamiento de materiales” están presentes en 4 clústeres cada una: forman el sustrato emprendedor compartido.
- **Núcleo tecnológico transversal** “Cierres para calzado”, “Clasificación y procesamiento postal” y “Diseño de calzado” se repiten en 4 clústeres; procesos de separación e impresión, en 3.
- **Producción:** solo “Otros accesorios de vestir/muebles” (×3) y “Petróleo crudo, energía eléctrica” (×2) se comparten.

2.3 Entendimiento de las Dinámicas productivas, comerciales y laborales de los clústeres

Se presenta un análisis integral de los clústeres estratégicos que impulsan la transformación económica de la región hacia su consolidación como Distrito Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación. Esta base productiva se articula a través de seis motores fundamentales: la agroindustria, enfocada en la seguridad alimentaria y la bioeconomía circular; la economía digital, que actúa como pivote para la exportación de propiedad intelectual y tecnologías de frontera; y la transición energética, orientada hacia la descarbonización territorial y el modelo de bajas emisiones. Asimismo, el análisis integra el desarrollo de un hábitat sostenible que busca resolver problemáticas de densificación y renovación urbana, la manufactura avanzada centrada en la reindustrialización mediante tecnologías de la Cuarta Revolución Industrial, y el clúster de

salud y biotecnología, diseñado para responder a las presiones demográficas a través de una alta densificación tecnológica asistencial. Comprender a profundidad el estado del tejido empresarial, las perspectivas de comercialización y las exigencias de cualificación del talento humano en cada uno de estos sectores proporcionará la información descriptiva necesaria para realizar una evaluación objetiva y fundamentar la posterior priorización estratégica de los clústeres.

2.3.1 Clúster Agroindustria, Alimentos y Nutrición

Composición Sectorial: El clúster está compuesto por los Grupos GICS Alimentos, bebidas y tabaco, Distribución y venta minorista de productos básicos de consumo. A su vez, integra desde los datos de la OMPI, los Dominios Oficiales de Agricultura, Agricultura y Alimentos, Agricultura y animales vivos, Ciencias Agrícolas y Ambientales, Salud. Adicionalmente, incorpora, desde las cuentas del PIB a precios corrientes de Antioquia, las ramas de actividad económica de Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca.

Resumen de Capacidades: Cuenta con un total de 31 capacidades, distribuidas en: Ciencia: 12, Tecnología: 11, Emprendimiento: 7 y Producción: 1.

Definición Estratégica: Este clúster se define como un motor de desarrollo económico regional que integra la seguridad alimentaria y la sofisticación productiva. Reúne capacidades vinculadas con la modernización agropecuaria mediante nuevos paradigmas tecnológicos, abarcando innovaciones desde la genética de insumos hasta el procesamiento avanzado y el desarrollo de alternativas de nutrición. Su articulación técnica se apalanca en plataformas de innovación abierta y programas de bioeconomía circular que promueven la valorización de subproductos en industrias maduras.

Propósito y Aplicación: Su propósito central es consolidar un hub agroindustrial de vanguardia capaz de anticipar y cumplir con las exigencias de sostenibilidad y crecimiento verde de los mercados globales. Sirve para optimizar la cadena de valor acortando distancias logísticas, mitigar el reto del envejecimiento de la fuerza laboral rural a través de la digitalización, garantizar la seguridad en el abastecimiento y promover la reducción de pérdidas postcosecha.

1. Estrategia Clúster y Estructura Productiva Regional

Medellín se consolida como Distrito Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación, dejando atrás los discursos institucionales para convertir a la agroindustria en un motor de desarrollo regional (Alcaldía de Medellín, 2026a). Bajo el Plan Maestro de Distrito Inteligente, la ciudad cambió la ejecución de proyectos aislados por un modelo operativo basado en misiones. Hoy, la seguridad alimentaria y la sofisticación productiva operan como los ejes que atraen inversión de alto valor (Alcaldía de Medellín, 2026b). Esta visión integra capacidades técnicas y financieras para posicionar a Antioquia como un centro agroindustrial capaz de cumplir con las exigencias de sostenibilidad de los mercados globales (Alcaldía de Medellín, 2026a).

El ecosistema se articula mediante plataformas como el AgCenter. Este espacio moviliza más de $1.800 millones para conectar retos de innovación abierta con empresas como Nacional de Chocolates y Alquería (Proantioquia, 2026). Programas como AlimentaTEC, Antójate de Antioquia y el CIACAVAT facilitan la transición hacia modelos AgTech y FoodTech. A través de ellos, se optimiza la cadena productiva desde la genética de semillas hasta el procesamiento (Breakthrough, 2023; Gobernación de Antioquia, 2026; Proantioquia, 2026). En paralelo, la iniciativa “Antioquia Biocompetitiva” destina $1.810 millones a la bioeconomía circular, enfocándose en un problema concreto: reducir las pérdidas postcosecha. Esto es vital para sectores maduros como el lácteo y el cacaotero, donde aprovechar subproductos mejora la rentabilidad y cumple las normas internacionales de crecimiento verde (Global Green Growth Institute, 2026).

La eficiencia del clúster depende de la infraestructura. Proyectos como Puerto Antioquia, el Túnel del Toyo y las Vías 4G eliminan cuellos de botella históricos en la logística de perecederos. Para asegurar el impacto de estas obras, la ACI Medellín exige un umbral de inversión de USD 15 millones en proyectos de logística. El

objetivo es soportar operaciones con escala suficiente para optimizar la cadena de frío y conectar a Urabá y el Valle de San Nicolás (ACI, 2026a).

Toda esta estructura responde a cambios en las normativas de salud pública y en las preferencias de consumo. Los productos tradicionales ceden terreno ante alternativas de origen natural y formatos listos para consumir. Con la entrada del "impuesto saludable" del 20 %, el volumen de ventas en 2025 registró caídas: 13 % en jugos, 8 % en bebidas energizantes y 21 % en concentrados en polvo. Las bebidas carbonatadas bajaron un 3 %, reduciendo su consumo per cápita a 49,2 litros. En contraste, el café listo para beber (RTD) experimentó un crecimiento del 27 %.

La cadena de valor agroalimentaria acorta las distancias físicas entre productor y consumidor. Las tiendas de descuento duro concentran actualmente el 63 % de las compras de mercado en Colombia. En la producción primaria, el acopio directo toma fuerza. Alpina aumentó su recolección de leche un 6,5 %, alcanzando 23 millones de litros mensuales al vincular a 2.000 ganaderos, y Colanta sumó 343 miembros a su red. En la logística digital B2B, plataformas como Seeri levantaron USD 2,5 millones de capital extranjero para sistematizar el abastecimiento de los pequeños comerciantes.

2. Tejido Institucional, Empresarial y Dinámica Comercial

Antioquia respalda su liderazgo agroindustrial con 14.728 empresas, conformando uno de los ecosistemas productivos más densos de la región (CCMA, 2026). Esta base cuenta con apoyo institucional para llevar el conocimiento técnico desde la política pública directamente a las plantas de producción (PwC, 2026). El clúster está compuesto en un 97 % por Mipymes, las cuales operan junto a empresas ancla como Grupo Nutresa, Grupo Bios y Unibán (CCMA, 2025). Con 24,3 empresas por cada mil habitantes, el entorno reduce las barreras de entrada para nuevos inversores al ofrecer redes de proveeduría especializadas (CCMA, 2026).

El mercado nacional atraviesa una fase de consolidación. La estabilización en la oferta agrícola y el uso de formatos de distribución eficientes ayudan a mitigar el impacto de la inflación y las altas tasas de interés. En 2024, el mercado de alimentos, bebidas y tabaco alcanzó los 51.89 billones de pesos (un crecimiento del 4,0 %), y la venta minorista cerró en 179.9 billones de pesos (alza del 5,6 %).

El ecosistema regional logra que el 47 % de sus empresas participen en iniciativas de competitividad, apoyadas por el CUEE, Ruta N, el G8 de universidades, la ANDI, Augura y Fenalco (ACI, 2026a). En el ámbito internacional, las exportaciones se enfocan en nichos de alto valor. Destacan el banano y plátano con USD 627,1 millones, y el café con USD 495,2 millones. Las flores mantienen un volumen exportador constante, mientras productos como el aguacate hass y los extractos de té muestran un crecimiento sostenido (ACI, 2026a).

El comercio prioriza opciones que equilibran precio y calidad. A nivel global, los alimentos de marca propia transitan hacia la premiumización (estrategia de mercado donde una empresa eleva el valor percibido de un producto o servicio para justificar un precio más alto), apuntando a un mercado de 626.040 millones de dólares para 2032. A nivel local, los formatos de descuento duro dominarán con ventas proyectadas de 79.845 billones de pesos para 2029. Este volumen es impulsado, en parte, por la población extranjera residente, que gasta 2,4 veces más que el promedio nacional en productos de gran consumo.

Proteger los márgenes logísticos y de manufactura exige incorporar tecnología. A nivel global, la digitalización llevará al mercado agroindustrial a 4,5 billones de dólares en 2034. En Colombia, el uso de sensores predictivos (IoT) redujo las mermas en la cadena de frío un 15 % en operaciones de FEMSA, y los sistemas de gestión de almacenes (WMS) elevaron la productividad un 30 %. La automatización muestra resultados tangibles: Alpina invirtió 80.000 millones de pesos en 2025 y logró ventas netas superiores a 1,1 billones de pesos.

3. Desarrollo de Talento Humano y Dinámicas Laborales

La competitividad en la agricultura 4.0 depende estrictamente de formar talento en biotecnología y gestión de datos. Este capital humano es el factor central para que el clúster mantenga su posición frente a centros

de producción globales altamente automatizados. Antioquia gradúa un promedio de 1.953 profesionales anuales en ciencias agropecuarias y recursos naturales. Sin embargo, el reto principal no es la cantidad de graduados, sino cerrar la brecha de competencias técnicas. La industria requiere perfiles capaces de operar sistemas de agricultura de precisión y liderar procesos FoodTech (DNP, 2024).

El sector enfrenta también un desafío demográfico crítico: el envejecimiento de la fuerza laboral rural. La edad promedio en el campo es de 57 años, y la participación de jóvenes es inferior al 20 %. Esta escasez de relevo generacional obliga a automatizar los procesos de forma inmediata para reducir la dependencia de mano de obra física (DNP, 2024).

La digitalización del agro pasó de ser una alternativa de mejora a un requisito para mantener activa la producción. Al mismo tiempo, la urgencia de modernizar los cultivos abre una oportunidad clara para atraer inversión extranjera enfocada en la tecnificación de la cadena productiva (OMPI, 2026).

4. Inversión Extranjera Directa (IED) y Portafolios de Inversión

Medellín mantiene su posición como destino para el capital extranjero. Con la facilitación de la ACI Medellín, estas inversiones aportan liquidez, transferencia tecnológica y acceso a nuevos mercados (ACI, 2026a). En el primer semestre de 2026, la ciudad captó USD 408,5 millones en IED, superando los USD 168 millones del mismo periodo en 2025. La estrategia define montos mínimos para garantizar un impacto real: USD 5 millones en Agronegocios y USD 15 millones en Infraestructura (ACI, 2026a). Este flujo de capital se apoya en plataformas como MedInvest, Startia y el esquema de Obras por Impuestos 2.0 (ACI Medellín, 2026). La meta local es destinar más del 3 % a Actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación (ACTI), marcando una distancia frente al 0,018 % nacional, lo que genera una ventaja competitiva para atraer empresas de biotecnología (ACI, 2026a; Proantioquia, 2026; PwC, 2026).

El comercio electrónico y las nuevas superficies son las vías principales de expansión. El canal digital proyecta alcanzar USD 6.103,8 millones en 2026 con un crecimiento anual del 8,5 %. Los formatos de descuento duro proyectan escalar a 53.679,7 billones de pesos en ventas mediante 6.324 locales. En el exterior, los procesadores de carne lograron exportaciones históricas a China y Medio Oriente en 2025 (Fenalco Antioquia, 2026; Sectorial, 2025).

A pesar de estas cifras, los portafolios de inversión deben evaluar riesgos estructurales. El sector lácteo registró un déficit de USD 104 millones en la primera mitad de 2025, forzando la importación de USD 136 millones en materias primas. Además, las importaciones desde Asia enfrentan aranceles que superan el 25 %, y la carga impositiva local amenaza con reducir las ventas reales de las tiendas de barrio a 97.730,2 billones de pesos en 2026 (Fenalco Antioquia, 2026; PwC, 2026).

Para asegurar márgenes, el mercado se inclina hacia el bienestar de precisión. Los modelos de suscripción orientados a la salud mueven USD 3 billones globales. Los consumidores son más analíticos: el 61 % de los millennials revisa los componentes moleculares antes de efectuar una compra. En el segmento de bebidas, marcas como Veda Drinks capturaron el 36,76 % del volumen off-trade de café listo para beber en 2025.

Las decisiones de inversión están cada vez más condicionadas por marcos regulatorios y metas de reducción de la huella de carbono. Las empresas optan por el nearshoring y auditorías de cumplimiento para acatar normas como la directiva europea CSRD. Dado que el 72 % de los consumidores asume sobrecostos por empaques ecológicos, el mercado de envases sostenibles apunta a USD 53.82 billones en 2031, y los bioplásticos en Sudamérica llegarán a USD 1.482,3 millones para 2028. Adaptarse a estas normas es lo que garantiza que la región mantenga sus exportaciones tradicionales y opere como el centro de innovación alimentaria de América Latina (ACI, 2026a).

2.3.2 Clúster: Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos

Composición Sectorial: El clúster está compuesto por los Grupos GICS Bancos, Medios y entretenimiento, Seguros, Servicios al consumidor, Servicios comerciales y profesionales, Servicios de telecomunicaciones, Servicios financieros, Software y servicios, Tecnología, hardware y equipos. A su vez, integra desde los datos de la OMPI, los Dominios Oficiales de Gestión empresarial, Negocios y Economía, Ocio y Educación, Ciencias de la Computación, Salud, Hogar, Investigación y Tecnología, Madera, papel, textiles, Construcción, Máquinas y manufactura. Adicionalmente, incorpora, desde las cuentas del PIB a precios corrientes de Antioquia, las ramas de actividad económica de Información y comunicaciones, Actividades financieras y de seguros, Actividades profesionales, científicas y técnicas; Actividades de servicios administrativos y de apoyo, Actividades artísticas, de entretenimiento y recreación y otras actividades de servicios; Actividades de los hogares individuales en calidad de empleadores; actividades no diferenciadas de los hogares individuales como productores de bienes y servicios para uso propio.

Resumen de Capacidades: Cuenta con un total de 34 capacidades, distribuidas en: Ciencia: 6, Tecnología: 6, Emprendimiento: 21 y Producción: 1.

Definición Estratégica: Se constituye como el pivote fundamental de la transformación productiva del territorio orientada hacia un ecosistema de alto valor agregado e innovación. Reúne capacidades vinculadas con la convergencia de tecnologías de frontera, operando bajo estándares que fusionan la soberanía tecnológica con la eficiencia energética. Este ecosistema transita desde los soportes físicos hacia arquitecturas inmateriales, soluciones en la nube y modelos de servitización.

Propósito y Aplicación: Tiene como propósito rediseñar estructuralmente la vocación económica, pasando de una provisión de servicios básicos a una plataforma exportadora de propiedad intelectual y soluciones de alta complejidad. Su aplicación práctica es estandarizar la toma de decisiones basada en evidencia, abordar desafíos urbanos complejos y cerrar las brechas de formación técnica para garantizar la resiliencia y competitividad internacional a largo plazo.

1. Estrategia Clúster y Estructura Productiva Regional

El clúster de Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos es el eje central del cambio económico en Medellín. Su objetivo es consolidar a la ciudad como Distrito Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTI). Esta transición representa un rediseño estructural de la economía regional, un paso vital para garantizar la resiliencia y competitividad de la capital antioqueña hacia 2035. Al integrar tecnología directamente en el entorno urbano como sensores de tráfico o sistemas de recolección inteligente de residuos, la ciudad resuelve problemas complejos de movilidad y sostenibilidad. Esto posiciona al clúster como el motor de un ecosistema de alto valor (Alcaldía de Medellín, 2026a).

El “Plan Maestro Distrito Inteligente” funciona como la ejecución táctica de la Ley 2286 de 2023, que obliga a planificar el desarrollo bajo nuevos esquemas tecnológicos. La ciudad opera con una arquitectura de gobernanza fundamentada en el uso de datos. Esta estructura se articula mediante las Misiones de Transformación, destacando la M6 de Gobierno Digital. Todo el modelo se apoya en el Data Lake Distrital y en la plataforma FIWARE. Este sistema actúa como un cerebro de interoperabilidad que estandariza la comunicación de dispositivos, permitiendo, por ejemplo, que los índices de calidad del aire se crucen en tiempo real con el control de semáforos para una gestión pública basada en evidencia (Alcaldía de Medellín, 2026b).

Una infraestructura tecnológica de clase mundial respalda la capilaridad de este ecosistema. Instituciones como Ruta N, el Distrito Especial de CTI (CONPES 4130) y el Centro para la Cuarta Revolución Industrial (C4IR) actúan como nodos para escalar proyectos. Este impacto se materializa en los barrios a través de las redes libres de WIFI. El flujo financiero es provisto por plataformas como Startia y Medellín Venture Capital. Ellas aseguran que el capital llegue a iniciativas con proyección global (DNP, 2024).

La integración de Inteligencia Artificial, Blockchain, Ciberseguridad e IoT configura el nuevo estándar de “Biocompetitividad”. Este concepto une la soberanía tecnológica con la eficiencia energética, haciendo de

la descarbonización un pilar de la competitividad digital. Declarar los Data Centers como infraestructura regional crítica es clave. Esta medida soporta el inmenso flujo de datos y blinda al Distrito frente a cortes de energía (Breakthrough, 2023). La competitividad se refleja físicamente en una velocidad de descarga corporativa promedio de 473,50 Mbps y una logística aeroportuaria optimizada, asegurando que Medellín marque la pauta de sostenibilidad en la próxima década (ACI, 2026a). Esta infraestructura sostiene un tejido empresarial en constante expansión (Alcaldía de Medellín, 2026b).

La estructura productiva transita desde soportes físicos hacia arquitecturas basadas en algoritmos y conectividad. El hardware tradicional registró una caída anual del 12,3 % en 2025, y la ocupación en edición de software empaquetado bajó un 8,8 %. Los ingresos por telefonía de voz cayeron a 417.000 millones de pesos, contrastando con el despliegue del 5G, que capturó más del 9 % de los accesos móviles en su primer año (Alcaldía de Medellín, 2026b; Sectorial, 2025). Las exportaciones tecnológicas destacan con las tarjetas inteligentes y soluciones de biometría, representando el 45,6 % de las ventas externas. Internamente, la demanda prioriza la renovación de teléfonos (36,0 %) y computadores (20,0 %). Los servicios migran hacia la nube y la tercerización especializada. Aunque la ocupación en servicios profesionales (BPO/KPO) bajó un 5,4 %, el 61,7 % de estas empresas invierte hoy en IA conversacional, como bots de atención automatizada. El crédito digital superó los 12 billones de pesos en 2024, creciendo un 48 %, y el 76,1 % de la población ya usa billeteras digitales. En entretenimiento, el 65 % de los usuarios de televisión por suscripción accede al streaming desde su operador principal (Sectorial, 2025).

2. Tejido Institucional, Empresarial y Dinámica Comercial

La densidad del ecosistema empresarial y su fuerte articulación gremial catalizan la resiliencia económica de la región. Esta red permite pasar de una economía de servicios básicos a una exportadora de propiedad intelectual y soluciones complejas (ACI, 2026a). El inventario de Negocios Digitales cuenta con 6.843 empresas registradas, marcando un crecimiento interanual del 9,6 %. La especialización es evidente: el 56 % de las organizaciones desarrolla software. Esto demuestra una capacidad instalada orientada a crear valor de uso directo, como la programación de plataformas SaaS (*Software as a Service*), y no solo a brindar soporte técnico periférico (CCMA, 2024).

La estructura de este tejido es asimétrica pero sinérgica. Las Mipymes, que representan más del 97 % del total, inyectan la agilidad necesaria para renovar los modelos de negocio del sector. A la par, grandes empresas tractoras como Svait Group, Pragma, Ceiba y HMV lideran la servitización tecnológica. Estas compañías integran a las Mipymes en sus cadenas de suministro globales, elevando los estándares de todo el clúster a requerimientos internacionales (ACI, 2026b).

A nivel nacional, el ecosistema digital consolida a Colombia como un polo estratégico. El mercado de Software y Servicios alcanzó los 44.25 billones de pesos en 2024, con un crecimiento acumulado del 50 % desde 2020. El hardware sumó 2.9 billones, las telecomunicaciones 30.86 billones, y los servicios financieros, impulsados por las Fintech, llegaron a unos 46.87 mil millones de dólares. La gestión gremial de entidades como la CCMA, la ANDI y Proantioquia permite exportar servicios digitales por valores de entre USD 150M y USD 260M, manteniendo una inversión neta del 26,2 % (ANDI, 2026).

Esta dinámica comercial se nutre de tendencias globales. Las corporaciones aumentan sus presupuestos de TI; se proyecta que el gasto mundial supere los 6,08 billones de dólares en 2026. El software capturará casi el 60 % de este crecimiento hasta 2029. En Sudamérica, el mercado de provisión de talento especializado alcanzará los 31.130 millones de dólares (PwC, 2026). Para optimizar costos, más del 70 % de las nuevas aplicaciones empresariales para 2025 utilizarán arquitecturas de bajo código (*low-code/no-code*), permitiendo a personal sin formación en ingeniería estructurar software básico. La IA Generativa estima elevar la productividad corporativa hasta en un 30 %, ayudando a sectores como el asegurador a reducir costos operativos al automatizar la gestión de pagos y siniestros.

3. Desarrollo de Talento Humano y Dinámicas Laborales

El capital humano es el activo más determinante para el futuro del clúster. Alinear la educación técnica con las demandas de la Industria 4.0 definirá si la región supera el estancamiento de los ingresos medios (ACI, 2026a). Medellín gradúa a 45.238 personas al año, incluyendo 9.677 ingenieros y 2.187 especialistas en TI. Aunque el volumen de profesionales es alto, la economía digital exige una escalabilidad mayor para cumplir los objetivos de desarrollo del Distrito Especial (Alcaldía de Medellín, 2026a).

El ecosistema enfrenta dos obstáculos estructurales severos. Primero, el déficit de bilingüismo: el 91,5 % de las vacantes exige un nivel de inglés B1 o superior, pero apenas el 14 % de los estudiantes cumple el requisito. Segundo, existe una marcada brecha de género en carreras STEM. Solo el 36 % de las personas graduadas en ciencia y tecnología son mujeres. Esta baja participación resta talento disponible y afecta la diversidad en el diseño de soluciones tecnológicas (Alcaldía de Medellín, 2026a).

Para corregir este escenario, el Distrito implementa formatos de educación ágil mediante bootcamps y el programa "Medellín Digital Talent". Esta estrategia busca capacitar al personal técnico requerido para alcanzar la meta de 100.000 empleos en Antioquia. Paralelamente, la Inversión Extranjera Directa eleva la calidad del mercado laboral, vinculando actualmente a 10.800 profesionales en puestos de desarrollo de software bajo estándares internacionales. Cerrar estas brechas de talento es un requisito indispensable para atraer más capital foráneo y escalar las operaciones de mayor valor (ACI, 2026a; Alcaldía de Medellín, 2026a).

4. Inversión Extranjera Directa (IED) y Portafolios de Inversión

La Inversión Extranjera Directa (IED) funciona como el principal canal de transferencia tecnológica. Además, valida el talento de Medellín al integrarlo con redes corporativas mundiales (ACI Medellín, 2026). La confianza internacional en la ciudad registró la captación de USD 408,5 millones en el primer semestre de 2026. Esta cifra se suma al acumulado de USD 4.623 millones gestionados en 418 proyectos desde 2008. Los servicios tecnológicos lideran la atracción de capital, representando el 36 % de esa inversión histórica (ACI, 2026a)

Esta inyección de capital responde a la urgencia global por digitalizar procesos. El déficit calculado de 130.754 profesionales para 2030 genera oportunidades directas para empresas que ofrecen talento bajo demanda (KPO). A su vez, el nearshoring impulsó la fabricación electrónica un 5,4 %, movilizando 2,9 billones de pesos. El mercado nacional recibirá una inversión de 600 millones de dólares por parte de Mercado Libre para 2026. Medellín resulta atractiva para firmas de Estados Unidos o Europa porque sus costos laborales son entre un 30 % y un 50 % más competitivos frente al mercado estadounidense (ACI, 2026a).

Los mecanismos locales para dinamizar este flujo incluyen redes como MedInvest, Ruedas de Inversión y el modelo de Obras por Impuestos 2.0. Para participar en tecnología y outsourcing, se exige un capital mínimo de USD 1 millón y modelos comerciales ya validados (ACI, 2026b). Sin embargo, el sector enfrenta riesgos operativos críticos. El entorno corporativo colombiano sufre un promedio de 2.053 ciberataques semanales, un 40 % más que la media global. Existe también una dependencia logística severa: el 70,3 % de las importaciones de tecnología proviene de China. El clúster padece una informalidad del 45,3 % en manufactura de hardware y del 12,2 % en desarrollo de software, a lo que se suma la incertidumbre frente a proyectos de ley como el N.º 043 de 2025 para regular la Inteligencia Artificial.

En respuesta, los fondos de inversión se centran en la mitigación de vulnerabilidades y la autonomía operativa. El gasto en IA crecerá al 29 % anual hasta 2028, con estimaciones de consumir el 5 % de la electricidad de América Latina en 2035. En finanzas, herramientas como la tokenización logran reducir costos de transacción por debajo del 1 %. Frente a la amenaza del cibercrimen, el mercado de la ciberseguridad proyecta superar los 200.000 millones de dólares en 2028. Para diversificar la cadena de suministro, el país ya importa el 13,6 % de su tecnología desde México y el 14,6 % desde Brasil. La articulación de estas acciones consolida a Antioquia (14,7 % del PIB nacional) y a Medellín (8,3 %) como el nodo tecnológico y económico más estable de la región (ACI, 2026a; Breakthrough, 2023; Forbes Colombia, 2025) .

2.3.3 Clúster Energía y Sostenibilidad Ambiental

Composición Sectorial: El clúster está compuesto por los Grupos GICS Energía, Servicios públicos. A su vez, integra desde los datos de la OMPI, los Dominios Oficiales de Ingeniería y Energía, Materias primas y minería, Químicos, Construcción, Ciencias Agrícolas y Ambientales. Adicionalmente, incorpora, desde las cuentas del PIB a precios corrientes de Antioquia, las ramas de actividad económica de Explotación de minas y canteras, Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado; Distribución de agua; evacuación y tratamiento de aguas residuales, gestión de desechos y actividades de saneamiento ambiental.

Resumen de Capacidades: Cuenta con un total de 28 capacidades, distribuidas en: Ciencia: 19, Tecnología: 0, Emprendimiento: 8 y Producción: 1.

Definición Estratégica: Se define como el pilar fundamental de la descarbonización territorial que transforma la matriz productiva hacia un modelo de bajas emisiones y alta sofisticación técnica. Reúne capacidades vinculadas con la confiabilidad de generación, la integración de fuentes renovables no convencionales, el almacenamiento energético distribuido y la preservación del capital hídrico. Su operación converge con infraestructuras de economía circular para el aprovechamiento de residuos y el saneamiento.

Propósito y Aplicación: Su propósito es posicionar al territorio como un nodo de servicios de ingeniería avanzada y sostenibilidad, garantizando que el desarrollo económico se desvincule del uso intensivo de combustibles fósiles. Se aplica para modernizar la red operativa mediante tecnologías predictivas, descentralizar la administración de los recursos y proteger la infraestructura crítica ante la volatilidad climática y operativa.

1. Estrategia Clúster y Estructura Productiva Regional

La ruta hacia la descarbonización regional tiene un horizonte claro a diez años. Se apoya en un marco regulatorio donde la gobernanza se basa en datos y en la colaboración de múltiples sectores. Este modelo permite que el crecimiento económico comparta el mismo ritmo que la resiliencia climática. La Visión 2035 refleja esta alineación: 40 entidades públicas coordinan hoy misiones específicas, como la consolidación del *Energy Valley*, la modernización de la movilidad y el fortalecimiento jurídico del Distrito Especial.

La confiabilidad eléctrica del clúster depende de grandes infraestructuras como Hidroituango, San Carlos, Guatapé y Riogrande (ACI Medellín, 2026). Sin embargo, el esquema nacional está cambiando. Los combustibles fósiles ceden terreno. En 2024, la producción de petróleo cayó a 41 millones de toneladas, un 24 % menos que su pico histórico en 2015. El carbón muestra un escenario similar, con exportaciones reducidas en un 40 % frente a 2017 para cumplir la meta de apagar las termoeléctricas a carbón en 2030 (ACI, 2026a).

Frente a esta caída, las energías renovables aceleran. Proyectos solares como Guayepo y La Loma buscan llevar la capacidad instalada no convencional al 25 % para 2037. La transición también exige eficiencia en los recursos básicos. El consumo de agua potable bajó a 10,95 metros cúbicos mensuales en 2024 y la tala de madera se redujo significativamente. Al mismo tiempo, los servicios se descentralizan. La iniciativa *Energy Valley*, liderada por EPM e ISA, incorpora analítica a los procesos regionales. En el plano nacional, 100 comunidades energéticas se formalizaron operativamente y plataformas como Unergy abrieron la puerta a la inversión ciudadana en proyectos limpios. La economía circular también muestra resultados tangibles: 1.215 organizaciones de recicladores recuperaron casi 3 millones de toneladas en 2024, optimizando centros de aprovechamiento como La Pradera (ACI, 2026a; Consejo Privado de Competitividad, 2026).

2. Tejido Institucional, Empresarial y Dinámica Comercial

El ecosistema empresarial funciona gracias a la conexión estructurada entre los grandes conglomerados energéticos y una red de pequeñas y medianas empresas técnicas. Operan en un mercado nacional que movió 6.300 millones de dólares en energía durante 2024 y que exige altos niveles de eficiencia. Por ejemplo, las redes de agua registran pérdidas de 10,34 metros cúbicos por usuario al mes, una cifra que supera el tope

legal y presiona la urgente modernización de las infraestructuras.

A nivel local, la especialización productiva crece de manera sostenida. El Clúster de Energía Sostenible cerró 2023 con 1.399 empresas (creciendo al 6,6 %) y el de Hábitat Sostenible superó las 22.900 compañías. Entidades como la CCMA, la ANDI y la ACI Medellín articulan este tejido junto a empresas tractoras como EPM y Erco Energía. Los resultados comerciales acompañan esta dinámica, registrando un aumento del 9,8 % en exportaciones impulsadas por equipos de transmisión y servicios de ingeniería eléctrica (ACI, 2026a).

El clima y la tecnología marcan el ritmo de la demanda. Cuando el fenómeno de El Niño redujo los embalses al 28,57 %, el mercado no regulado buscó alternativas rápidas, concentrando en la energía solar el 45 % de los nuevos proyectos en ideación. Además, la proyección global anticipa que el auge de los centros de datos aumentará la demanda eléctrica un 60 % en dos décadas. Para soportar esta carga sin multiplicar el gasto en fierros y cemento, las empresas optan por la optimización. Integrar inteligencia artificial en las redes de acueducto o implementar gemelos digitales permite elevar la producción renovable hasta un 20 % y reducir las pérdidas de distribución, que hoy promedian un 40 % a nivel regional.

3. Desarrollo de Talento Humano y Dinámicas Laborales

La infraestructura más avanzada pierde utilidad sin el personal adecuado. La mayor ventaja competitiva de Antioquia para exportar servicios especializados es su volumen de profesionales técnicos calificados. Las instituciones de la red G8 han adaptado sus programas curriculares a la Industria 4.0. Hoy priorizan la formación en ingeniería eléctrica orientada a redes inteligentes, analítica de datos y gestión ambiental (ACI, 2026a).

Esta alineación entre la academia y las necesidades del mercado genera resultados medibles. Entre 2008 y 2025, los proyectos de inversión apoyaron la creación de más de 48.230 empleos formales. Para evitar que las habilidades queden obsoletas ante la economía verde, el Distrito implementa modelos educativos inmersivos y formación dual. Estas dinámicas conectan a los estudiantes con problemas corporativos reales y promueven la reconversión laboral (*reskilling*). Así, el talento regional mantiene su relevancia operativa frente a las exigencias tecnológicas de las empresas (Alcaldía de Medellín, 2026a).

4. Inversión Extranjera Directa (IED) y Portafolios de Inversión

Medellín mantiene una posición sólida como destino de inversión. Entre 2008 y 2025 atrajo 4.623 millones de dólares en inversión extranjera directa, respaldada por la gestión de la ACI Medellín y plataformas como MedInvest. La tendencia continuó durante el primer semestre de 2026, captando 408,5 millones de dólares, destacándose la inyección de 129 millones hacia Erco Energía (ACI, 2026). Históricamente, el sector energético absorbe hasta un 17 % de esta inversión distrital gracias a sus ventajas de conectividad y matriz firme.

El panorama nacional presenta tanto presiones estructurales como ventanas de oportunidad. El déficit de electricidad proyectado para 2027 abre opciones de negocio para 132 proyectos renovables que buscan inyectar nueva capacidad al sistema. Sin embargo, el sector enfrenta barreras operativas significativas. Durante 2025, la inversión nacional en servicios públicos cayó un 42,1 % (Proantioquia, 2026). Los desarrolladores lidian con un inminente déficit de gas que encarecerá las importaciones, un sistema de permisos que retrasa los proyectos solares de 3 a 7 años y congestiones recurrentes en la red de transmisión.

Ante estos riesgos, el capital se refugia en modelos de negocio más ágiles. Los sistemas de almacenamiento en baterías (BESS) y la infraestructura de bioeconomía, como el aprovechamiento de biomasa, representan hoy el 14 % de las iniciativas en etapa de ideación. A la par, el sector blinda financieramente sus operaciones. El 92 % de las generadoras advierte inestabilidad normativa, lo que ha impulsado los contratos de largo plazo (PPA) para asegurar ingresos. Finalmente, en el plano técnico, la infraestructura física y digital requiere cada vez más protección, motivando inversiones anuales que superan los 1.500 millones de dólares en saneamiento y una participación récord en simulacros de ciberseguridad para proteger la red red (Proantioquia, 2026).

2.3.4 Clúster Hábitat Sostenible y Estilo de Vida

Composición Sectorial: El clúster está compuesto por los Grupos GICS Bienes de consumo duraderos y prendas de vestir, Distribución y venta minorista discrecional de consumo, Fideicomisos de inversión inmobiliaria (REITs), Gestión y desarrollo inmobiliario, Productos para el hogar y personales, Servicios comerciales y profesionales. A su vez, integra desde los datos de la OMPI, los Dominios Oficiales de Bienes de consumo, Hogar, Ropa/Textiles, Madera, papel, textiles, Ocio y Educación, Construcción, Máquinas y manufactura, Gestión empresarial, Negocios y Economía, Salud, Ingeniería Civil, Químicos, Ciencias Sociales. Adicionalmente, incorpora, desde las cuentas del PIB a precios corrientes de Antioquia, las ramas de actividad económica de Construcción, Comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos automotores y motocicletas; Transporte y almacenamiento; Alojamiento y servicios de comida, Actividades inmobiliarias.

Resumen de Capacidades: Cuenta con un total de 46 capacidades, distribuidas en: Ciencia: 12, Tecnología: 12, Emprendimiento: 21 y Producción: 1.

Definición Estratégica: Este clúster representa la convergencia física y comercial entre el diseño urbano, la construcción ecoeficiente y el desarrollo de bienes de alto valor agregado. Reúne capacidades vinculadas con la ejecución de obras de infraestructura, la modernización energética de edificaciones, la digitalización inmobiliaria y la producción de bienes duraderos y de cuidado personal guiados por parámetros de sustentabilidad.

Propósito y Aplicación: Su propósito es consolidar modelos urbanos que solucionen problemáticas de habitabilidad a través de la renovación y densificación sostenible. Sirve para alinear la oferta residencial y comercial con los nuevos hábitos de consumidores enfocados en la prevención y la economía circular, a la vez que mitiga el riesgo de depreciación de los activos inmobiliarios frente a su huella de carbono.

1. Estrategia Clúster y Estructura Productiva Regional

Medellín tiene una meta clara a diez años: consolidarse como Distrito Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación bajo la Ley 2286 de 2023. La estrategia, alineada con el CONPES 4130, enfoca sus misiones en el medio ambiente y el desarrollo económico. El objetivo es práctico. Se busca crear una “ciudad de 15 minutos” donde la tecnología resuelva problemas de habitabilidad diarios, como reducir los tiempos de traslado o mejorar los servicios públicos básicos, para el año 2035 (Alcaldía de Medellín, 2026b).

La sostenibilidad es el eje central en este proceso. La Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia lidera estrategias de economía circular para mejorar la competitividad. Esto se traduce en acciones concretas, como una gestión eficiente de los escombros y la reutilización del agua en la industria de la construcción (CCMA, 2024). A la par, Antioquia ejecuta un plan de infraestructura de 17 billones de pesos. Proyectos como el Túnel del Toyo, las Autopistas 4G y la expansión del Metro representan el 17 % de la inversión extranjera. Estas obras convertirán la región en un centro logístico conectado directamente con los mercados de Norte y Centroamérica (ACI, 2026a).

Los hábitos de consumo también cambian de manera acelerada. Los colombianos priorizan hoy la prevención, la sostenibilidad y la utilidad real de lo que compran. Los números lo reflejan. Las ventas de electrodomésticos y muebles crecieron un 24,2 %, mientras que la producción tradicional de calzado cayó a 47 millones de pares. En salud y cuidado personal, la protección solar aumentó un 30,7 % y la dermocosmética un 24,2 %. En contraste, productos infantiles como los tratamientos para pañalitis cayeron, respondiendo a la baja tasa de natalidad del país.

El sector inmobiliario enfrenta ajustes por la presión de los costos. Los licenciamientos de vivienda de interés social y las construcciones no residenciales se redujeron a finales de 2025. Sin embargo, los servicios se adaptan con éxito. Los alojamientos de corta estancia, impulsados por plataformas digitales, crecieron más del 500 % en cuatro años. El leasing habitacional se duplicó en 2025. En los servicios profesionales (BPO), la inteligencia artificial absorbe las nuevas inversiones para automatizar la atención al cliente, reduciendo un 14,2 % la necesidad de personal temporal.

2. Tejido Institucional, Empresarial y Dinámica Comercial

El tejido productivo local creció un 7,2 % anual entre 2010 y 2023. Hoy suma 22.996 unidades productivas, de las cuales el 97 % son micro, pequeñas y medianas empresas (CCMA, 2024). Estas Mipymes operan de la mano con grandes actores industriales como Grupo Argos y plataformas tecnológicas como La Haus. Entidades como Ruta N, Camacol y Proantioquia respaldan este ecosistema, orientando al sector hacia la venta de servicios integrados en lugar de limitarse a la entrega de productos básicos (PwC, 2026).

El mercado resiste la inflación y el crédito costoso. Las valoraciones demuestran solidez comercial: los bienes duraderos y la ropa movieron 36,9 billones de pesos en 2024. La venta minorista discrecional superó los 107 billones. Y aunque el desarrollo inmobiliario se contrajo un 7,5 %, el gasto en productos para el hogar y cuidado personal creció un 16 %, superando los 3.200 millones de dólares.

El crecimiento futuro se apoya en modelos de alto valor. El alquiler institucional de vivienda (*multifamily*) capta ya el 40 % de la demanda de los hogares arrendatarios en Colombia. Para mantener los márgenes, la industria aplica la tecnología con resultados medibles. La analítica de datos en la moda reduce el inventario estancado en bodegas hasta en un 15 %. Los empaques de tamaño concentrado eliminan el 70 % del desperdicio de plástico. En la construcción, las actualizaciones energéticas de los edificios antiguos generan ahorros de electricidad que oscilan entre el 10 % y el 40 %.

3. Desarrollo de Talento Humano y Dinámicas Laborales

La operatividad de este ecosistema depende directamente de sus profesionales. Antioquia cuenta con talento altamente calificado en áreas críticas como arquitectura, ingeniería civil y gestión ambiental. Esta base técnica convierte a Medellín en un punto de interés preferente para la instalación de centros de servicios corporativos globales. En 2023, el sector reportó 375.238 empleos directos formales. La Inversión Extranjera Directa ha sido determinante, generando más de 48.230 puestos de trabajo formales adicionales desde 2008 (ACI, 2026a).

Aun así, la dinámica laboral asume transformaciones importantes. La automatización redujo en un 5,4 % la ocupación total en el segmento de servicios externalizados. Además, el incremento proyectado del 23 % al salario mínimo para 2026 presiona los costos operativos, amenazando con encarecer la mano de obra en construcción hasta en un 15 %. Para retener el talento frente a la escasez de especialistas, las empresas estructuran ecosistemas de movilidad transfronteriza, permitiendo a los ingenieros y arquitectos locales trabajar en proyectos europeos sin salir de América Latina (Alcaldía de Medellín, 2026a).

4. Inversión Extranjera Directa (IED) y Portafolios de Inversión

La Inversión Extranjera Directa financia la base operativa del clúster. La ACI Medellín gestionó flujos por 4.623 millones de dólares distribuidos en 418 proyectos. El peso económico de la región es evidente: Antioquia aporta el 14,7 % del PIB nacional (PwC, 2026). Para atraer capitales serios, la región exige propuestas estructuradas. Se requieren inversiones mínimas de 15 millones de dólares en infraestructura, respaldadas por un portafolio o “Deck de inversión” con un modelo de negocio validado (ACI, 2026b).

El mercado local ofrece vías de rentabilidad tangibles. El Fondo Nacional del Ahorro planea financiar propiedades sin cuota inicial para 2026, abriendo el mercado a miles de arrendatarios. La vivienda que no es de interés social creció un 19 % en ventas. Además, modelos de negocio como el nearshoring permiten que el país exporte el 50,9 % de sus servicios profesionales a Estados Unidos. Pero los riesgos también son reales. La reducción proyectada del 35,7 % en los subsidios públicos de vivienda limitará la liquidez de las constructoras. Simultáneamente, la importación masiva de ropa a través de plataformas asiáticas creció un 27 %, golpeando duramente a la manufactura textil local.

Para blindar los portafolios de inversión, el capital se refugia en la tecnología y la mitigación de riesgos. Los electrodomésticos para hogares inteligentes apuntan a un mercado de casi dos billones de dólares globales para 2035. En el área inmobiliaria corporativa, la urgencia es ambiental. Se requiere invertir miles de millones

en la adecuación climática de millones de metros cuadrados de oficinas, con el único fin de evitar que estos edificios se conviertan en activos financieramente inservibles debido a las penalizaciones por su alta huella de carbono.

2.3.5 Clúster Manufactura Avanzada y Materiales

Composición Sectorial: El clúster está compuesto por los Grupos GICS Automóviles y componentes, Bienes de Capital, Materiales, Semiconductores y equipos semiconductores, Transporte. A su vez, integra desde los datos de la OMPI, los Dominios Oficiales de Maquinaria y transporte, Transporte, Bienes de consumo, Plásticos, caucho y cuero, Construcción, Ingeniería Civil, Ingeniería y Energía, Máquinas y manufactura, Materiales de construcción y bienes preciosos, Materias primas y minería, Metales comunes y productos metálicos, Químicos, Madera, papel, textiles, Ciencias Agrícolas y Ambientales, Ciencias de la Computación, Ciencias Físicas y Matemáticas, Investigación y Tecnología. Adicionalmente, incorpora, desde las cuentas del PIB a precios corrientes de Antioquia, la rama de actividad económica de Industrias manufactureras.

Resumen de Capacidades: Cuenta con un total de 59 capacidades, distribuidas en: Ciencia: 29, Tecnología: 12, Emprendimiento: 12 y Producción: 6.

Definición Estratégica: Constituye el catalizador de la reindustrialización territorial mediante la integración sistemática de tecnologías avanzadas en los flujos de producción y ensamblaje. Reúne capacidades vinculadas con la automatización industrial, los sistemas ciberfísicos, los materiales compuestos sostenibles y la electrificación de la movilidad. Esta estructura productiva se apoya en una red logística multimodal diseñada para conectar nodos estratégicos y descentralizar operaciones.

Propósito y Aplicación: Tiene como propósito liderar la transición desde modelos de fabricación intensivos en carbono hacia procesos hiperconectados, eficientes y sostenibles. Se aplica para blindar las cadenas de suministro locales frente a disrupciones externas, optimizando las operaciones manufactureras mediante herramientas analíticas y logísticas avanzadas que aseguren la viabilidad competitiva.

1. Estrategia Clúster y Estructura Productiva Regional

La visión de Medellín hacia 2035 deja atrás la planificación urbana tradicional. La Ley 2286 de 2023 le otorga la categoría de Distrito Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación. Para hacerlo realidad, el Plan Maestro de Distrito Inteligente articula a 40 entidades públicas con una meta clara: resolver desafíos en movilidad, seguridad, medio ambiente, desarrollo económico, sociedad y gobierno digital. La reindustrialización de Antioquia se apoya directamente en tecnologías de la Cuarta Revolución Industrial. El enfoque está en la automatización, el Internet de las Cosas y la analítica de datos (ACI, 2026a; Alcaldía de Medellín, 2026a).

Este cambio transforma lo que produce la región. Los bienes de carbono ceden terreno ante alternativas más eficientes; a principios de 2026, los vehículos híbridos y eléctricos captaron más del 34 % de las ventas de vehículos ligeros, un contraste frente a la caída del 21,2 % en la producción de hierro en 2024 y el cierre de General Motors. En tecnología, las tarjetas inteligentes y la biometría dominan el 45,6 % de las exportaciones, mientras la venta de hardware tradicional cayó un 12,3 % anual. La infraestructura también cambia. Las plataformas digitales redefinen la logística B2B, respaldada por inversiones tangibles como los 600 millones de dólares de Mercado Libre. El procesamiento de datos creció un 8,0 % en 2025, y aerolíneas como Easyfly ajustan sus tarifas para retener su 2,43 % del mercado. Esta dinámica se apoya en una red multimodal donde proyectos como Puerto Antioquia, el Túnel del Toyo y las Autopistas 4G ya reducen los tiempos de tránsito de la carga industrial (ACI, 2026a).

2. Tejido Institucional, Empresarial y Dinámica Comercial

La base empresarial de Medellín y Antioquia opera en un mercado de alta competencia. El 97 % de las empresas son Mipymes. Estas conviven e interactúan a diario con corporaciones ancla como Renault-Sofasa, Incolmotos Yamaha, Haceb, Grupo Orbis, Enka y Argos (ACI, 2026a). Esta red encuentra respaldo estratégico en instituciones como la Cámara de Comercio de Medellín, la ANDI, Fenalco y Ruta N.

El mercado colombiano atraviesa una reestructuración profunda. La automatización avanza en medio de presiones inflacionarias y volatilidad geopolítica. Los resultados recientes muestran un panorama mixto: el sector de Transporte movió 49 billones de pesos en 2024, y los Bienes de Capital sumaron 347,2 millones de dólares para 2025. Los automóviles y componentes crecieron un 26,4 %, alcanzando 2,2 billones de pesos. La industria de semiconductores subió un 7,31 %, pero el mercado de materiales se contrajo un 5,0 %. La demanda manufacturera exige ahora hiperconectividad y logística rápida. Un ejemplo concreto de esta tendencia es el alza en ventas de camionetas utilitarias y vans, con picos de crecimiento del 82,2 % y 110,0 % a inicios de 2026. A nivel global, el gasto en centros de datos superará los 6 billones de dólares este mismo año. Para proteger la rentabilidad, la industria optimiza sus procesos. Herramientas como los gemelos digitales y el enfriamiento líquido marcan la pauta; la refrigeración líquida directa al chip moverá 15.750 millones de dólares en 2030, y en las bodegas, los vehículos automatizados (AGV) ya asumen hasta el 70 % de las tareas manuales (Proantioquia, 2026).

3. Desarrollo de Talento Humano y Dinámicas Laborales

El desarrollo del distrito depende del talento disponible en la región. Antioquia cuenta con personal calificado gracias a una red educativa que integra a las universidades del G8 con centros de formación técnica como el ITM y el SENA. Esta base de profesionales en ingeniería y manufactura permite a la ciudad responder a los requerimientos técnicos de la industria 4.0 (ACI, 2026a).

La llegada de inversión se traduce en empleo formal. Entre 2008 y 2025, se crearon más de 48.230 puestos de trabajo en el territorio, y la manufactura concentró el 14 % de esta inversión sectorial (ACI, 2026a). Las exigencias tecnológicas obligan a mantener este capital humano actualizado. Los modelos de formación dual y los laboratorios de prototipado facilitan el aprendizaje práctico. Además, los programas de actualización de competencias (*upskilling* y *reskilling*) preparan a los trabajadores para la digitalización de sus operaciones. Como ejemplo de integración, los perfiles más jóvenes adquieren destrezas en planta mediante esquemas de mentoría impartidos por la población *silver*, aprovechando el conocimiento acumulado en la industria (ACI, 2026a).

4. Inversión Extranjera Directa (IED) y Portafolios de Inversión

La captación de capital sostiene la expansión industrial de la ciudad. Entre 2008 y 2025, Medellín gestionó 4.623 millones de dólares en 418 proyectos de inversión extranjera; la manufactura avanzada absorbió el 14 % de ese total . Participar en este flujo exige estándares corporativos rigurosos: los proyectos requieren un mínimo de 2 millones de dólares y la entrega de documentación financiera, como *teasers* y *decks* detallados (ACI, 2026). Las concesiones 5G, que movilizarán hasta 4.000 millones de dólares, y la movilidad limpia impulsan este interés comercial. Se espera que 110.000 vehículos híbridos y eléctricos circulen por Colombia en 2026. A la par, el sector de fabricación electrónica creció un 5,4 % traccionado por las políticas de nearshoring (ACI, 2026a, 2026b).

No obstante, el panorama de inversión presenta riesgos sistémicos. Existe una alta dependencia de Asia, continente del que proviene el 70,3 % de las importaciones tecnológicas. La carga tributaria también aprieta los márgenes operativos. El arancel del 40,0 % impuesto a los vehículos de combustión para 2026 y la autorretención en transporte del 3,5 % comprometen la rentabilidad a corto plazo. A esto se suma una tasa de informalidad del 45,3 % en la fabricación de hardware. Frente a este escenario, las empresas ajustan sus cadenas de suministro. El *friendshoring* ayuda a mitigar barreras arancelarias, como el promedio del 19,5 %

aplicado en Estados Unidos. Mercados logísticos como México y Brasil proveen hoy el 13,6 % y 14,6 % de las autopartes que llegan a Colombia. Relocalizar la producción cerca de los centros de consumo respalda la competitividad de las empresas y apuntala el objetivo central del Distrito: destinar el 3 % de su PIB a actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación, garantizando su crecimiento a 2035 (Alcaldía de Medellín, 2026a).

2.3.6 Clúster Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida

Composición Sectorial: El clúster está compuesto por los Grupos GICS Equipos y servicios de atención médica, Productos farmacéuticos, biotecnología y ciencias de la vida. A su vez, integra desde los datos de la OMPI, los Dominios Oficiales de Biofarma y Salud, Ciencias Médicas y de la Salud, Salud, Ciencias de la Vida, Ciencias de la Computación, Psicología y Neurociencia, Productos químicos y farmacéuticos, Química y Farmacéutica, Investigación y Tecnología. Adicionalmente, incorpora, desde las cuentas del PIB a precios corrientes de Antioquia, la rama de actividad económica de Administración pública y defensa; planes de seguridad social de afiliación obligatoria; Actividades de atención de la salud humana y de servicios sociales.

Resumen de Capacidades: Cuenta con un total de 62 capacidades, distribuidas en: Ciencia: 49, Tecnología: 6, Emprendimiento: 6 y Producción: 1.

Definición Estratégica: Se erige como una plataforma de alta densificación tecnológica que articula la infraestructura hospitalaria de complejidad con la economía del conocimiento. Reúne capacidades investigativas y empresariales vinculadas con la salud digital, la genómica, la bioinformática y la manufactura farmacéutica, propiciando el escalamiento de terapias avanzadas y modelos asistenciales descentralizados.

Propósito y Aplicación: Su propósito es reconfigurar el modelo asistencial para responder eficazmente a las presiones demográficas y epidemiológicas, mitigando ineficiencias sistémicas mediante la digitalización y la automatización inteligente. Sirve para democratizar el acceso a tratamientos vitales mediante la producción local, consolidar redes de servicios especializados para pacientes internacionales y atraer capital destinado a fortalecer las cadenas de suministros clínicos e insumos médicos.

1. Estrategia Clúster y Estructura Productiva Regional

En Antioquia, la solidez del ecosistema de salud está liderada por la Cámara de Comercio de Medellín a través de la iniciativa “Medellín Health City”. Esta alianza cuenta con el respaldo de los Acuerdos 24/2012 y 078/2023, y del CONPES 4130. Gracias a esta base institucional, programas como “Antioquia Biocompetitiva” logran movilizar capital de la Gobernación de Antioquia, el GGGI, Comfama y el fondo UK PACT. La aceleradora MAPBIO+ funciona como un puente práctico: toma soluciones biotecnológicas locales y facilita su escalamiento hacia los mercados globales. En el Valle de Aburrá, la manufactura farmacéutica y los ensayos clínicos se están redefiniendo mediante la aplicación concreta de salud digital, inteligencia artificial, genómica y bioinformática (ACI, 2026a; Alcaldía de Medellín, 2026a).

Esta estructura se apoya en una red hospitalaria de alta complejidad. Instituciones como el Hospital San Vicente Fundación, el Pablo Tobón Uribe y la Clínica Las Américas lideran el proceso asistencial. A la par, el Aeropuerto Internacional José María Córdova sostiene la cadena de suministro, un nodo logístico que requiere inversiones de USD 15 millones para actualizar su infraestructura y adoptar modelos de bioeconomía circular (ACI, 2026a). El sector clínico avanza hacia la digitalización para reducir su dependencia de tecnologías e insumos extranjeros.

El panorama nacional atraviesa una crisis de liquidez. Esta situación provocó el cierre de 6.084 servicios de salud en el primer semestre de 2025, una caída del 5 % en la producción de medicamentos terminados en 2024 y una contracción comercial en la cadena minorista. A pesar de esto, las licencias obligatorias demostraron ser una vía efectiva de adaptación. Por ejemplo, la fabricación local del genérico para el VIH (Dolutegravir) redujo el costo a 15.000 pesos por dosis, logrando cobertura para más de 150.000 pacientes. Simultáneamente,

los servicios asistenciales se enfocan en la descentralización para descongestionar los hospitales de alta complejidad. Colombia recibió más de 22.600 pacientes extranjeros en 2024, consolidando sus plataformas de telesalud y turismo médico (Vamos, 2025). Ante ineficiencias históricas y deudas acumuladas por 6,4 billones de pesos con los laboratorios, los hospitales están ajustando su distribución y eludiendo a los gestores farmacéuticos tradicionales.

2. Tejido Institucional, Empresarial y Dinámica Comercial

La densidad empresarial en Medellín y su área metropolitana es determinante para la economía antioqueña. Este ecosistema aporta el 14,7 % del PIB nacional mediante la integración de servicios tecnológicos medios y altos. Entre 2010 y 2023, el sector mantuvo una Tasa de Crecimiento Anual Compuesta del 6,3 %. El 97 % de los actores son Mipymes que interactúan con empresas ancla como EPS e IPS Sura, el Hospital Pablo Tobón Uribe y Health Prime. La colaboración entre gremios empresariales y académicos (ANDI, Fenalco, Proantioquia, Ruta N, el G8 y el CUEE) impulsó un aumento anual del 4,3 % en las exportaciones de servicios KPO e ITO (ACI, 2026a; Alcaldía de Medellín, 2026a).

Este grupo opera en un mercado de salud que enfrenta una reestructuración forzada, donde las nuevas tecnologías conviven con una marcada fragilidad financiera. Aun así, las cifras mantienen una tendencia de expansión. El mercado de productos farmacéuticos y ciencias de la vida alcanzó los 29,6 billones de pesos en 2024, registrando un crecimiento del 16,7 %. Los equipos y servicios médicos, por su parte, llegaron a 7,7 billones de pesos en 2025, creciendo a una tasa del 6,0 %.

La dinámica comercial se concentra en productos biofarmacéuticos y servicios ambulatorios. Se estima que el mercado de medicamentos genéricos en Colombia alcanzará los 12,7 billones de pesos para 2028. A nivel regional, la venta de medicamentos biológicos en Sudamérica pasará de 14.052 millones de dólares en 2024 a más de 20.713 millones en 2029. Frente a esta demanda, la escasez de personal y la inflación exigen soluciones basadas en automatización. Las inversiones globales en inteligencia artificial médica subirán de 20.000 millones de dólares en 2025 a 100.000 millones en 2030. Un caso práctico es el uso de IA agéntica en la industria biofarmacéutica: esta tecnología reduce a la mitad el tiempo de documentación clínica y eleva los márgenes EBITDA hasta 5,4 puntos, mitigando costos administrativos que hoy superan los 300.000 millones de dólares anuales en Estados Unidos (Alcaldía de Medellín, 2026a).

3. Desarrollo de Talento Humano y Dinámicas Laborales

El capital humano y la formación en áreas STEAM sostienen la productividad del clúster en Medellín. Antioquia cuenta hoy con profesionales calificados en medicina, bioinformática e ingeniería biomédica. Esto ha convertido al Valle de Aburrá en un motor de formalización laboral y una opción atractiva para la relocalización de talento global (ACI Medellín, 2026). Sin embargo, el sector enfrenta retos organizacionales específicos. Existen brechas evidentes en bilingüismo y persisten dificultades para que los investigadores de ciencias básicas asuman roles directivos dentro del sector privado (ACI, 2026a; Alcaldía de Medellín, 2026a).

Para cerrar estas brechas, el territorio estructuró cuatro rutas de formación que abarcan distintas etapas del desarrollo profesional. La primera se enfoca en la infancia mediante semilleros que acercan a niños y adolescentes a las disciplinas STEAM. La segunda ruta, centrada en educación superior, implementa herramientas técnicas modernas como la simulación clínica. La tercera ruta atiende a los adultos activos a través del *reskilling* y *upskilling*, capacitándolos en el manejo de protocolos de telemedicina. Finalmente, la ruta dirigida a la población *Silver* aprovecha la experiencia de profesionales mayores mediante mentorías directas, asegurando que el conocimiento técnico se transfiera a las nuevas generaciones sin perderse en el retiro (Alcaldía de Medellín, 2026a).

4. Inversión Extranjera Directa (IED) y Portafolios de Inversión

Medellín ha mantenido un flujo constante de Inversión Extranjera Directa. Entre 2008 y 2025, la ciudad captó USD 4.623 millones, financiando 418 proyectos y generando 48.230 empleos. Durante el primer semestre de 2026, la gestión de USD 408,5 millones consolidó a las Ciencias de la Vida como el principal foco de inversión, acaparando la atención por encima de los servicios de tecnología y la manufactura . Los proyectos en este clúster exigen una inversión mínima de USD 3 millones. A cambio, instrumentos como MedInvest ofrecen ahorros operativos tangibles, reduciendo los costos entre un 30 % y un 50 % en comparación con Estados Unidos (ACI, 2026a).

Los portafolios de inversión responden directamente al envejecimiento demográfico y al aumento de patologías crónicas. Las proyecciones indican que las ventas farmacéuticas nacionales llegarán a 32,5 billones de pesos hacia 2028, y el mercado de dispositivos médicos alcanzará los 10,3 billones en 2030. Esto abre la puerta a soluciones prácticas, como el despliegue de ecógrafos portátiles para el diagnóstico en zonas rurales aisladas. A escala global, el sector de telesalud y monitoreo remoto crecerá de 219.310 millones a 1,27 billones de dólares para 2034, mientras que los fabricantes de terapias celulares proyectan un valor de 29.490 millones de dólares para 2035.

A pesar de las ventajas regionales, los inversores deben considerar los riesgos fiscales del país. El déficit estructural del sistema de salud colombiano se calcula en 19,7 billones de pesos para 2025. Las aseguradoras deben 24,0 billones a las clínicas (con un 56 % de la cartera en mora), y los hospitales adeudan más de 4,3 billones a la industria farmacéutica. A esto se suma un déficit comercial proyectado de 21,2 billones para 2028 por la dependencia de importaciones. Frente a la vulnerabilidad de las cadenas de suministro, la industria está optando por la relocalización o nearshoring. El clúster antioqueño se posiciona como una jurisdicción estable para acoger estas plantas, en línea con una tendencia global que moviliza acuerdos de tecnología médica por 97.600 millones de dólares para proteger la manufactura de insumos críticos.

2.4 Criterios de Madurez y Dinamismo de las dinámicas productivas, comerciales y laborales de los clústeres

El presente capítulo desarrolla una caracterización de seis clústeres estratégicos consolidando y estructurando la información en un marco de análisis dividido en dos grandes dimensiones que permiten comprender a profundidad el estado actual, las brechas y el potencial de cada sector.

La dimensión de Madurez (Ver Tabla 2), que diagnostica la capacidad instalada, la consolidación estructural y el peso económico actual de las industrias. Este apartado profundiza en tres criterios: El PIB a precios corrientes y su desempeño comercial consolidado, la densidad empresarial que conforma el tejido productivo (abarcando desde Mipymes hasta empresas ancla), y finalmente, las dinámicas de empleo y talento, incluyendo la disponibilidad de profesionales capacitados y los retos demográficos del mercado laboral.

Respecto a la dimensión de Dinamismo (Ver Tabla 3 y Tabla 4) evalúa el grado de evolución y la capacidad de transformación hacia el futuro de los clústeres. Esta sección detalla siete criterios fundamentales: la captación de Inversión Extranjera Directa (IED) y flujos de capital, la alineación estratégica con metas de sostenibilidad, el nivel de sofisticación tecnológica e innovación (CTI), y la dinámica exportadora. Así mismo, mapea los proyectos o iniciativas clave que habilitan el crecimiento, junto con la tracción y el impacto sistémico que cada clúster ejerce sobre la competitividad de los demás sectores.

La consolidación de todo este volumen de información técnica, financiera y operativa es un paso indispensable para la estructuración de la fase de priorización. Documentar de forma simultánea fortalezas como los megaproyectos de infraestructura o las altas tasas de inversión junto con vulnerabilidades críticas y la dependencia de insumos importados o el envejecimiento del talento, proporciona la evidencia empírica directa que se requiere para alimentar modelos de toma de decisiones.

Al contar con estos insumos estandarizados, es posible construir matrices de evaluación multicriterio y aplicar metodologías rigurosas como el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP). Esto garantiza que la priorización final de las apuestas productivas no dependa de percepciones aisladas, sino que esté ponderada sobre datos verificables, permitiendo focalizar los esfuerzos estratégicos y los recursos del territorio en aquellos clústeres con mayor capacidad para detonar el desarrollo económico integral.

2.4.1 Madurez

PIB (M1) a precios corrientes: Es el valor monetario de todos los bienes y servicios finales que produce la región durante un periodo determinado calculado (2025), utilizando los precios que están vigentes en el mercado en el momento en que se realiza la medición.

Densidad Empresarial (M2) Volumen absoluto de unidades productivas registradas en el ecosistema, analizando su morfología estructural: la proporción mayoritaria de micro, pequeñas y medianas empresas (Mipymes) interactuando sinérgicamente con corporaciones industriales tractoras (empresas ancla) y redes gremiales consolidadas.

Empleo/Talento (M3): Cifras relacionadas con la generación de puestos de trabajo formales derivados de la inversión y la disponibilidad de una masa crítica de graduados especializados. Identifica además los cuellos de botella que amenazan la continuidad operativa, tales como el envejecimiento demográfico de la base trabajadora, la informalidad y las brechas en competencias críticas (como el bilingüismo o la retención de perfiles STEM).

Tabla 2: Evaluación de clústeres: criterios de madurez. Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

Clúster	M1. PIB a precios corrientes (2025)	M2. Densidad empresarial	M3. Empleo, talento y dinámica laboral
1. Agroindustria, alimentos y nutrición	Alimentos: $51,89 billones (+4,0 %, 2024); café RTD: +27 %. PIB clúster: $24.063 mil millones COP.	14.728 empresas (97 % mipymes; 24,3 por cada 1.000 habitantes). Anclas: Nutresa, Bios, Unibán y Alpina.	1.953 graduados/año; edad laboral promedio: 57 años; participación juvenil: inferior al 20 %.
2. Economía digital, software y servicios TI	Software/servicios: $44,25 billones; hardware tradicional: -12,3 %. PIB clúster: $51.530 mil millones COP.	6.843 empresas (+9,6 %); 56 % en desarrollo de software. Anclas: Svait Group, Pragma y Ceiba.	45.238 graduados (9.677 ingenieros); 10.800 empleos por IED. Bilingüismo B1+: 14 %; mujeres STEM: 36 %.
3. Energía y sostenibilidad ambiental	Exportaciones de carbón: -40 %; alza en servicios públicos. PIB clúster: $24.311 mil millones COP.	1.399 empresas operativas (+6,6 %). Mercado mayorista liderado por EPM e ISA.	Talento G8 en ingeniería eléctrica y ambiental; formación dual en tecnologías limpias.
4. Hábitat sostenible y estilo de vida	Bienes de consumo y prendas: +9,4 %; licencias de vivienda VIS: -3,3 %. PIB clúster: $84.390 mil millones COP.	22.996 unidades productivas (97 % mipymes; +7,2 %). Anclas: Grupo Argos, Conconcreto y La Haus.	375.238 empleos (+2,8 %); presión salarial proyectada: 23 %; fuga de talento KPO.
5. Manufactura avanzada y materiales	Mercado automotriz: +26,4 %; materiales base: -5 %; producción siderúrgica: -21,2 %. PIB clúster: $34.444 mil millones COP.	97 % mipymes; anclas: Renault-Sofasa, Yamaha, Haceb, Orbis y Argos.	Formación para Industria 4.0, laboratorios de prototipado y programas de recualificación.
6. Salud, biotecnología y ciencias de la vida	Farmacéuticos y ciencias de la vida: +16,7 %; cierre de 6.084 servicios médicos en 2025. PIB clúster: $32.756 mil millones COP.	Crecimiento CAGR: 6,3 %; anclas: Sura y Hospital Pablo Tobón Uribe. Deudas a laboratorios: $6,4 billones.	Talento en bioinformática y biomedicina (4 rutas STEAM); débil integración de investigadores básicos al sector privado.

2.4.2 Dinamismo

Inversión Extranjera Directa (IED) (D1): Determina por flujos de capital internacional, presentando acumulados históricos como las gestiones recientes. Incorpora las barreras de entrada al analizar los montos mínimos de inversión exigidos para viabilizar proyectos estructurales y la disponibilidad de ecosistemas de conexión financiera en el territorio.

Alineación Estratégica (D2): Directrices de planificación territorial (como el Plan Maestro del Distrito Inteligente). Presenta la transición tangible del sector hacia modelos de bioeconomía circular, descarbonización de la matriz productiva y adopción de normativas internacionales para la mitigación del riesgo climático.

Sofisticación Tecnológica y Capacidades CTI (D3): Define la velocidad y profundidad con la que el sector migra de esquemas analógicos e intensivos en recursos hacia la automatización y la digitalización. Refleja la implementación directa de soluciones de la Cuarta Revolución Industrial para reducir mermas, optimizar la logística y escalar hacia la creación de propiedad intelectual.

Este criterio también incluye las capacidades actuales de la OMPI por clúster, las cuales están distribuidas para su normalización interna con los siguientes datos:

- Agroindustria: 31 capacidades (12 C, 11 T, 7 E, 1 P)
- Economía Digital: 34 capacidades (6 C, 6 T, 21 E, 1 P)
- Energía: 28 capacidades (19 C, 0 T, 8 E, 1 P)
- Hábitat Sostenible: 46 capacidades (12 C, 12 T, 21 E, 1 P)
- Manufactura Avanzada: 59 capacidades (29 C, 12 T, 12 E, 6 P)
- Salud y Biotecnología: 62 capacidades (49 C, 6 T, 6 E, 1 P)

Dinámica Exportadora (D4): Analiza la competitividad exterior del clúster, revisando volúmenes de exportación tradicionales frente al desarrollo de bienes y servicios de alto valor agregado. Contempla la capacidad del sector para capitalizar tendencias globales de relocalización de cadenas de suministro (estrategias de nearshoring o friendshoring) como respuesta a la volatilidad geopolítica y arancelaria.

Proyectos Clave (D5): Articulación de megaproyectos de infraestructura física (vías de cuarta generación, puertos, túneles) e infraestructura tecnológica (arquitecturas de datos, conectividad) que eliminan cuellos de botella logísticos y actúan como plataformas habilitadoras para la expansión operativa del clúster.

Tracción Sistémica (D6):Rol del clúster como proveedor de tecnologías base, infraestructura crítica o insumos esenciales que obligan a los demás eslabones de la economía a modernizarse. Evidencia cómo sus soluciones resuelven ineficiencias en otras industrias, generando una interdependencia técnica que eleva los estándares de competitividad de toda la región.

Impacto Sistémico (D7): Contribución estructural del sector para resolver los grandes desafíos del territorio a largo plazo. Refleja cómo el desarrollo del clúster transforma dimensiones críticas como la habitabilidad urbana, la seguridad alimentaria, la cobertura en salud pública o la gobernanza basada en evidencia, asegurando la resiliencia del distrito ante futuras disrupciones.

2.5 Priorización de clúster bajo criterios de Madurez y Dinamismo

La metodología aplicada parte del Índice Compuesto basado en el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP por sus siglas en inglés) (Go et al., 2019). Esta estructura metodológica proporciona un esquema matemático

Tabla 3: Evaluación de clústeres: criterios de dinamismo. Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

Clúster	D1. IED y capital	D2. Alineación estratégica y sostenibilidad	D3. Sofisticación tecnológica y CTI	D4. Dinámica exportadora y ventas
1. Agroindustria	Inversiones mínimas: USD 5 M en agronegocios y USD 15 M en logística e infraestructura. Riesgo: déficit de USD 104 M en lácteos (importación de materias primas con arancel del 25 %).	Transición hacia la bioeconomía circular (reúso de derivados de cacao y lácteos); empaques ecológicos impulsados por la normativa europea CSRD.	IoT: reducción de mermas de perecederos del 15 %. Sistemas WMS: productividad logística de hasta +30 %.	Dominio sostenido en exportaciones de banano (USD 627,1 M) y café (USD 495,2 M). Crecimiento exponencial del aguacate hass y los extractos.
2. Economía digital	Captura hegemónica del 36 % de la IED histórica y USD 408,5 M en H1 2026. Monto mínimo ACI: USD 1 M.	Alineación total con la Misión 6 (Gobierno Digital), orientada a la descarbonización de los Data Centers como infraestructura crítica.	Ecosistema basado en la plataforma FIWARE e IA generativa, que elevará la productividad corporativa del 10 % al 30 %.	Exportaciones de servicios TI de alto valor: entre USD 150 M y USD 260 M anuales. Biometría y tarjetas: 45,6 % de las exportaciones.
3. Energía	Concentra entre el 12 % y el 17 % de la IED distrital; inyección de USD 129 M (Erco). Afectado por bloqueos burocráticos del nivel nacional.	Transición articulada mediante la Visión 2035; prioriza comunidades energéticas y metas de 1 a 3 GW en hidrógeno verde al 2030.	Despliegue de sistemas BESS y gemelos digitales, que mejoran un 20 % el rendimiento y la predictibilidad de las renovables.	Exportaciones sectoriales: +9,8 %, impulsadas por servicios de ingeniería eléctrica y equipos técnicos.
4. Hábitat sostenible	17 % de la IED histórica. Inversión mínima: USD 15 M (infraestructura). Riesgo comercial por recortes en subsidios públicos de vivienda.	Diseño urbano de la "ciudad de 15 minutos"; *retrofits* energéticos para rescatar inmuebles "varados" por su huella de carbono.	Integración Proptech (más de 87 M de interacciones) y analítica de inventarios que reduce los *stockouts* físicos en un 25 %.	Servicios BPO: 50,9 % se exporta a EE.UU. El *retail* sufre presión por el alza del 27 % en importaciones asiáticas de moda.
5. Manufactura	14 % de la IED histórica. Inversión mínima: USD 2 M. Rigidez por mayor autorretención y aranceles (40 % a autos de combustión).	*Friendshoring* logístico hacia México y Brasil para sortear la inestabilidad geopolítica y arancelaria mundial.	Reconversión a la 4IR: circuitos 3D IC y vehículos AGV que eliminan hasta el 70 % de las labores manuales.	Exporta componentes biométricos, pero depende en extremo de China (70,3 % de sus insumos importados).
6. Salud y biotecnología	Priorización sectorial de inversión en H1 2026. Inversión mínima: USD 3 M. Vulnerabilidad por deudas de 24 billones hacia clínicas.	Apuesta por la bioeconomía y la descentralización para desaturar la infraestructura hospitalaria de alta complejidad.	IA agéntica: mejora proyectada del margen EBITDA de 3 a 5 puntos porcentuales; adopción de ecógrafos portátiles rurales.	Turismo médico especializado (22.600 pacientes internacionales en 2024). Exportaciones KPO e ITO: +4,3 %.

Tabla 4: Evaluación de clústeres: criterios de dinamismo (parte 2. Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

Clúster	D5. Proyectos e iniciativas clave	D6. Tracción sistémica	D7. Impacto sistémico
1. Agroindustria	Plataformas de capital AgCenter (>$1.800 M) y megaproyectos logísticos que eliminan cuellos de botella (Puerto Antioquia, Túnel del Toyo).	Habilita e impulsa el mercado de descuento duro (concentra el 63 % de las ventas del hogar) y dinamiza inversiones en ecosistemas B2B.	Asegura directamente la provisión de alimentos del territorio y elimina ineficiencias ecológicas críticas mediante la reducción de pérdidas postcosecha.
2. Economía digital	Ejecución del Data Lake Distrital, el ecosistema Startia y los Centros de Software.	Provee infraestructura lógica habilitadora (soluciones *low-code/no-code*) que permite la modernización operativa y financiera de los demás clústeres.	Resuelve ineficiencias estructurales mediante una gobernanza basada en evidencia e incrementa la inclusión financiera (76,1 % en billeteras digitales).
3. Energía	Estrategia *Energy Valley*, megaproyectos solares a gran escala (Guayepo y La Loma) y saneamiento hídrico mediante la PTAR Canoas.	Asegura las matrices descarbonizadas y la energía confiable requerida para operar las infraestructuras de hiperconectividad e industria avanzada.	Protege la estabilidad del territorio frente al cambio climático (p. ej., fenómeno de El Niño) y corrige ineficiencias locales en redes de acueducto (IPUF).
4. Hábitat sostenible	Apalancado por un plan vial y logístico de $17 billones, que incluye Autopistas 4G y el Tren del Río (Metro).	Su masividad demográfica y física estimula directamente la comercialización en ferreterías, manufacturas no metálicas y la democratización del crédito habitacional.	Modifica físicamente la habitabilidad de Medellín, fomentando la densificación, el reordenamiento urbano y el uso circular del agua.
5. Manufactura	Dinamizado logísticamente por la apertura de Puerto Antioquia y la estructuración tecnológica de las concesiones 5G ($4.000 M).	Fabrica los aceros, materiales compuestos y *hardware* base que hacen viables la expansión inmobiliaria y el despliegue de redes digitales.	Lidera la renovación de las líneas de movilidad y ensamblaje hacia modelos limpios, agilizando además los tiempos de las rutas regionales.
6. Salud y biotecnología	Implementación de la plataforma Medellín Health City, la aceleradora MAPBIO+ y el impulso disruptivo a la innovación en genéricos locales.	Autonomía lograda al formular genéricos (p. ej., tratamiento para VIH de bajo costo). Blinda al sistema contra crisis de importación.	Responde directamente a las crisis de salud pública y mitiga los riesgos derivados del envejecimiento demográfico territorial, asegurando la cobertura clínica.

estandarizado para consolidar y ponderar criterios multidimensionales heterogéneos, permitiendo convertir valoraciones económicas directas y datos cualitativos en un ranking cuantitativo unificado entre 0 y 1.

El Índice Compuesto de Priorización Basado en AHP (AHP-Based Composite Index) es un método cuantitativo utilizado para ordenar, clasificar o priorizar diferentes alternativas (como sectores, proyectos, inversiones, regiones o proveedores) mediante la combinación de múltiples criterios de evaluación.

Este enfoque fusiona la metodología de construcción de índices compuestos (que reduce un conjunto de indicadores complejos a un solo valor numérico) con el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), un modelo matemático desarrollado por Thomas Saaty que calcula de forma precisa el peso o la importancia de cada criterio. En lugar de asignar la importancia de los criterios al azar, se utiliza AHP para darles un peso matemático riguroso.

Se realizan comparaciones pareadas (uno contra uno) entre los criterios utilizando la escala de Saaty, estas comparaciones se organizan en una matriz matemática y se calcula el vector propio (eigenvector) de la matriz, lo que genera los pesos porcentuales de cada criterio (cuya suma total es 100 %). Finalmente, se verifica la consistencia de las respuestas mediante el Índice de Consistencia (CI) para asegurar que las decisiones de los equipos de evaluación y priorización no sean contradictorias. Dado que los criterios originales de las alternativas suelen medirse en unidades diferentes (por ejemplo: dinero, toneladas, encuestas de satisfacción, o porcentajes), no se pueden sumar directamente. Los datos se transforman a una escala común (usualmente de 0 a 1 o de 0 a 100) utilizando métodos como la normalización. Para cada alternativa, se multiplican sus datos normalizados por los pesos obtenidos en el paso de AHP. Al final, se suman todos los resultados para obtener un único valor numérico del Índice Compuesto como indica Ecuación 1.

$$\text{Indice Compuesto} = \sum_{i=1}^{n} (w_i \times I_i) \tag{1}$$

Donde, w_i es el peso del criterio obtenido por AHP e I_i , es el indicador normalizado.

2.5.1 Definición de Criterios y Reglas de Evaluación

2.5.1.1 Criterios y Subcriterios:

- Madurez: PIB (M1), Densidad Empresarial (M2) y Empleo/Talento (M3).
- Dinamismo: IED (D1), Alineación Estratégica (D2), Sofisticación Tecnológica (D3), Dinámica Exportadora (D4), Proyectos Clave (D5), Tracción Sistémica (D6) e Impacto Sistémico (D7).

2.5.1.2 Escala de Evaluación:

Para el criterio M1 (datos absolutos), se utilizarán los valores reportados. Para los demás criterios, dada la heterogeneidad y los componentes narrativos, se aplicará la escala fundamental de Saaty (del 1 al 9, donde 1 = igual/mínima importancia y 9 = extrema importancia o desempeño superior).

Escala Saaty: Es una de las contribuciones más destacadas al campo del análisis de decisiones multicriterio. En este proceso, las ponderaciones de los componentes del índice se generan a partir de comparaciones, de vigilancia del entorno, de la inclusión de diferentes fuentes de información y cifras y aspectos relevantes de los criterios que fueron analizada por el equipo de Mapeo Dinámico del Centro de Pensamiento. Estas ponderaciones se realizan sobre las cinco medidas de importancia sectorial. Estas comparaciones se basan en la importancia percibida de cada medida para los criterios específicos de madurez y dinamismo descritos. Las calificaciones presentadas en la Tabla 5 (igual preferencia o importancia) a 9 (fuerte preferencia del clúster en ese criterio).

Tabla 5: Escala de importancia relativa de Saaty. Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

Valoración	Preferencia
1	Igual importancia
3	Importancia moderada
5	Gran importancia
7	Importancia muy alta
9	Importancia extrema
2, 4, 6, 8	Valores

2.5.1.3 Ausencia de Información:

No se reporta el número absoluto total de empresas para los clústeres Manufactura y Salud, lo cual impide una normalización matemática directa de M2. Para subsanarlo, todos los clústeres en M2 se evalúan uniformemente bajo la escala de Saaty a partir de los atributos de densidad descritos (ej. “97 % Mipymes”, “alta mortalidad”).

2.5.1.4 Pesos de Evaluación (Supuesto Explícito):

Los documentos no contienen una matriz de comparación por pares ni especifican que un criterio tenga mayor jerarquía que otro. Para garantizar objetividad y evitar sesgos, se asume un peso equitativo del 10 % (W_c = 0.1) para cada uno de los 10 criterios (3 de Madurez y 7 de dinamismo).

El peso constante de 0.1 (o 10 %) no es una característica inherente a los clústeres, sino el valor asignado a los criterios de evaluación, y surge como un supuesto matemático necesario ante la falta de información sobre las preferencias estratégicas de quienes toman las decisiones.

Al estructurar el análisis con exactamente 10 criterios de evaluación (3 de Madurez y 7 de Dinamismo), la suma de sus pesos relativos debe equivaler matemáticamente al 100 % (o 1.0) para estructurar el índice. Ante la ausencia de un dictamen que indique qué criterio es más importante, la solución matemática más neutral e imparcial es dividir el 100 % entre los 10 criterios (1.0 / 10 = 0.1).

Los pesos ponderan la importancia de la variable (ej. PIB (M1)), no al clúster evaluado. Para que el ranking sea objetivo, la regla de medición debe ser idéntica para todos los competidores. Si se define que la “Atracción de Inversión” representa el 10 % de la nota final, representará ese mismo 10 % para Agroindustria, Energía o Manufactura. Lo que hace que un clúster gane o pierda es su desempeño interno

Se utilizó un peso constante (equitativo) exclusivamente para evitar inventar preferencias subjetivas que no estaban escritas en los documentos proporcionados.

2.5.1.5 Normalización:

Procedimiento de Eichhorn, expresado en la Ecuación 2 para escalar todas las mediciones (financieras o puntajes de Saaty) entre 0 y 1. Su versión final, está expresada por la Ecuación 3.

$$\left(\hat{e}_{i,c} = \frac{e_{i,c}}{\sum_{i=1}^{n} e_{i,c}}\right), \tag{2}$$

$$R_i^* = \sum_{c=1}^{10} W_c \cdot \hat{e}_{i,c}. \tag{3}$$

2.5.2 Evaluación de Clústeres (Puntajes Brutos)

Evaluación de cada criterio (Madurez y Dinamismo) de los clusters aplicando la escala Saaty, se puede ver en la Tabla 6.

Tabla 6: Evaluación de clústeres: puntajes brutos. Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

Criterio / Clúster	Agroindustria	Economía Digital	Energía	Hábitat Sostenible	Manufactura	Salud y Biotecnología
M1 (Miles de Millones)	24.063	51.530	24.311	84.390	34.444	32.756
M2 (Escala Saaty)	7	5	2	9	5	3
M3 (Escala Saaty)	2	8	7	9	5	6
D1 (Escala Saaty)	4	9	6	7	6	5
D2 (Escala Saaty)	7	8	9	8	5	6
D3 (Escala Saaty)	6	9	7	6	9	8
D4 (Escala Saaty)	9	7	5	6	3	5
D5 (Escala Saaty)	7	8	8	9	7	7
D6 (Escala Saaty)	6	9	9	7	8	6
D7 (Escala Saaty)	8	8	8	7	6	9

2.5.3 Datos normalizados

La creación de una Tabla Comparativa de Datos Normalizados (Ver Tabla 7), es un paso matemático obligatorio en la metodología de índices compuestos (como el AHP) porque permite integrar y comparar variables que poseen unidades de medida y escalas de magnitud completamente incompatibles entre sí.

En esta evaluación, el criterio M1 (PIB a precios corrientes) se expresa en magnitudes financieras absolutas (Miles de Millones de pesos COP), mientras que los demás criterios se valoran mediante la escala cualitativa de Saaty del 1 al 9. Es matemáticamente incorrecto sumar o promediar “24.063 Miles de Millones” con “7 puntos”. La normalización resuelve esto (utilizando el procedimiento de Eichhorn) al convertir todos los datos crudos en una fracción adimensional proporcional entre 0 y 1, lo que permite ponderarlos y agregarlos en un índice único. Además, revela el peso relativo exacto de cada clúster frente al total del ecosistema.

2.5.3.1 Ejemplo: Cálculo paso a paso para el valor 0.0957 (Agroindustria en el Criterio M1):

La Ecuación 4 de normalización aplicada exige dividir el valor individual del clúster entre la suma total de los valores de todos los clústeres para ese mismo criterio:

$$\hat{e}_i = \frac{e_i}{\sum_{i=1}^{n} e_i} \tag{4}$$

1. Identificar el dato crudo (e_i) : El valor de PIB reportado para Agroindustria en Antioquia es de 24.063 Miles de Millones COP.
2. Calcular el denominador (Suma total): Se agrupan los valores brutos de M1 para los 6 clústeres:
   - Agroindustria: 24.063 .
   - Economía Digital: 51.53
   - Energía: 24.311
   - Hábitat Sostenible: 84.390
   - Manufactura: 34.444
   - Salud y Biotecnología: 32.756
   - Suma Total: 24.063 + 51.530 + 24.311 + 84.390 + 34.444 + 32.756 = 251.494 Miles de Millones COP.
3. Ejecutar la Ecuación 5:

$$\hat{e}_{\text{Agro}} = \frac{24.063}{251.494} \tag{5}$$

$$\hat{e}_{\text{Agro}} = 0{,}0957\ldots \tag{6}$$

Tabla 7: Tabla comparativa de datos normalizados ($\hat{e}$). Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

Criterio / Clúster	Agroindustria	Economía Digital	Energía	Hábitat Sostenible	Manufactura	Salud y Biotecnología
M1: PIB	0.0957	0.2049	0.0967	0.3356	0.1370	0.1302
M2: Densidad	0.226	0.161	0.065	0.290	0.161	0.097
M3: Empleo	0.054	0.216	0.189	0.243	0.135	0.162
D1: IED	0.108	0.243	0.162	0.189	0.162	0.135
D2: Alineación	0.163	0.186	0.209	0.186	0.116	0.140
D3: Sofisticación	0.119	0.131	0.108	0.177	0.227	0.238
D4: Exportación	0.257	0.200	0.143	0.171	0.086	0.143
D5: Proyectos	0.152	0.174	0.174	0.196	0.152	0.152
D6: Tracción	0.133	0.200	0.200	0.156	0.178	0.133
D7: Impacto	0.174	0.174	0.174	0.152	0.130	0.196
Suma total bruta	**1.482**	**1.890**	**1.521**	**2.096**	**1.484**	**1.526**

Después se calcula el puntaje final R^* de cada cluster, mediante la suma ponderada de sus indicadores, multiplicando el valor normalizado de cada criterio por el peso de importancia asignado a dicho criterio dentro del modelo de le Ecuación 7:

$$R_i^* = \sum_{c=1}^{n} W_c \cdot \hat{e}_{i,c} \tag{7}$$

Donde R_i^* es el índice de priorización final del clúster i, W_c es el peso o nivel del criterio asigando c (obtenido a través de la metodología AHP o, en nuestro primer escenario, asumido equitativamente como 10 % o 0.1) y $\hat{e}_{i,c}$ es el valor normalizado del clúster i en el criterio c.

A continuación, la Tabla 8 presenta el Puntaje Final R^* , para cada uno de los clústeres:

Tabla 8: Puntaje final por clúster (basado en tabla normalizada). Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

Métrica / Clúster	Agro-industria	Economía Digital	Energía	Hábitat Sostenible	Manufactura	Salud y Bio-tecnología
Puntaje final (R^*)	**0.148**	**0.189**	**0.152**	**0.210**	**0.148**	**0.153**

2.5.3.2 Ejemplo paso a paso (Clúster Agroindustria con pesos equitativos del 10 %):

Para calcular el puntaje final de Agroindustria, se toma el valor normalizado que obtuvo en cada uno de los 10 criterios y se multiplica por su peso correspondiente (0.1).

1. M1 (PIB): 0.0957 x 0.1 = 0.00957
2. M2 (Densidad): 0.226 x 0.1 = 0.0226
3. M3 (Empleo): 0.054 x 0.1 = 0.0054
4. D1 (IED): 0.108 x 0.1 = 0.0108
5. D2 (Alineación): 0.163 x 0.1 = 0.0163
6. D3 (Sofisticación): 0.119 x 0.1 = 0.0119
7. D4 (Exportación): 0.257 x 0.1 = 0.0257
8. D5 (Proyectos): 0.152 x 0.1 = 0.0152
9. D6 (Tracción): 0.133 x 0.1 = 0.0133
10. D7 (Impacto): 0.174 x 0.1 = 0.0174

Al sumar todos estos resultados parciales, se obtiene 0.148. Dado que matemáticamente esto equivale a multiplicar la suma total bruta de los datos normalizados (1.482) por el peso constante (0.1), el Puntaje Final R^* resultante para Agroindustria se redondea y establece en 0.148. Partiendo del puntaje final de los clústeres se genera la priorización y justificación estratégica

2.5.4 Clústeres priorizados según criterios de Madurez y Dinamismo

1. Hábitat Sostenible (0.210): Tiene un peso real en el mercado, apalancado por un PIB de 84.390 Miles de Millones de pesos, el más alto de todo el tejido económico evaluado. Este contundente de madurez (M1) se complementa con su histórica tendencia en generación de empleo, su densa base empresarial y el impulso constante de megaproyectos de infraestructura (D5). Además, su alto volumen de capacidades emprendedoras y tecnológicas consolida firmemente su liderazgo por encima de la economía digital.
2. Economía Digital (0.189): mantiene una altísima competitividad gracias su participación en el PIB de 51.530 Miles de Millones de pesos que asegura su fuerte valoración financiera (M1). Su descenso relativo se explica por evidenciar una menor densidad científica pura en comparación con otros sectores, pero conserva una posición hegemónica en la atracción de Inversión Extranjera (D1) y sigue siendo el principal habilitador de tracción (D6) transversal para el resto de los clústeres.
3. Salud y Biotecnología (0.153): La incorporación de su PIB (32.756 Miles de Millones de pesos) sincera su impacto real en el mercado (M1), superando su histórica crisis de liquidez y destrucción de densidad

empresarial (M2). Al liderar la base científica del territorio y poseer la mayor resiliencia demográfica e impacto sistémico (D7), este clúster demuestra que su potencial y sus capacidades CTI logran compensar las fricciones de corto plazo, superando a sectores tradicionales.

4. Energía (0.152): Es sumamente competitivo. Presenta el segundo PIB más bajo del grupo (24.311 Miles de Millones de pesos), lo que refleja su dependencia de unas pocas empresas ancla y un mercado más concentrado (M1, M2). Sin embargo, logra sostener su alta posición en el ranking general gracias a su dinamismo en alineación estratégica (D2) y su tracción sistémica (D6), lo cual amortigua la brecha de implementación tecnológica detectada frente a su alta base científica.
5. Agroindustria (0.148): Registra el menor PIB entre los clústeres evaluados (24.063 Miles de Millones de pesos). A esto se le suma un volumen bajo de capacidades CTI totales y un riesgo latente por envejecimiento del talento (M3). No obstante, el clúster evita una caída mayor gracias a que lidera la dinámica exportadora tradicional (D4) y mantiene una alta densidad empresarial base que actúa como amortiguador sistémico.
6. Manufactura Avanzada (0.148): Posee un peso de mercado considerablemente mayor, con un PIB de 34.444 Miles de Millones de pesos. A pesar de puntuar alto en capacidades de producción y sofisticación hacia la Cuarta Revolución Industrial (D3), el modelo penaliza conglomerado por su vulnerabilidad a la dependencia de importaciones (D4) y las fricciones arancelarias. Estas debilidades estructurales frenan su competitividad real, relegándolo a la última posición a pesar de su volumen económico.

2.5.5 Matriz de priorización estratégica

A continuación, la Figura 7 se presenta la Matriz de Priorización Estratégica, la cual integra los ejes de Madurez y Dinamismo a partir de las sumas ponderadas correspondientes a los últimos valores normalizados

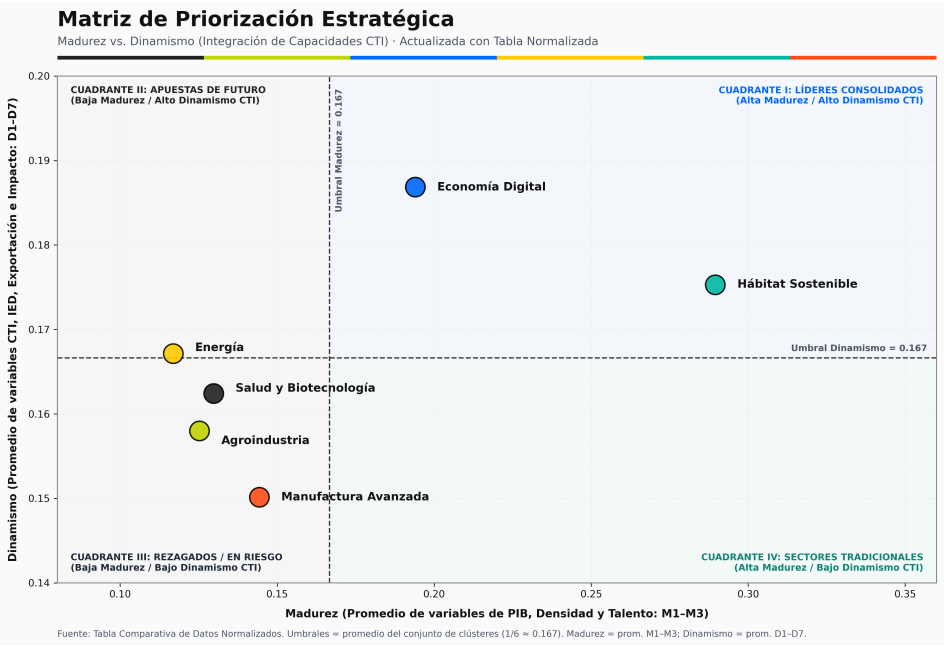


Figura 7: Matriz de Priorización Estratégica. Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026.

Inicio de Líneas punteadas

Son el punto donde un clúster “promedio” quedaría exactamente en el centro de la matriz:

- Línea vertical (eje X): a su derecha, el clúster tiene más peso que el promedio en PIB, densidad y talento (alta Madurez).
- Línea horizontal (eje Y): por encima, tiene más peso que el promedio en IED, alineación, sofisticación, exportación, proyectos, tracción e impacto (alto Dinamismo).

Umbral de Madurez (0.167): Es la línea vertical que separa a los clústeres de menor y mayor madurez. Se calcula como el promedio de los puntajes de Madurez de los seis clústeres (0.125, 0.194, 0.117, 0.290, 0.144 y 0.130), y coincide con 1/6. Esto no es casualidad: cada criterio normalizado suma 1 entre los seis clústeres, por lo que el valor promedio esperado de cualquier criterio es 1/6.

El umbral funciona entonces como un punto de referencia neutral, que representa el peso que tendría un clúster "promedio" en las variables de mercado, densidad empresarial y talento (M1 a M3). Los clústeres a la derecha, Economía Digital (0.194) y Hábitat Sostenible (0.290), tienen una base económica, empresarial y de empleo superior a la del conjunto. Los demás quedan a la izquierda, con una base más reducida o concentrada.

Umbral de Dinamismo (0.167): Es la línea horizontal que separa a los clústeres de menor y mayor dinamismo. Se calcula como el promedio de los puntajes de Dinamismo de los seis clústeres (0.158, 0.187, 0.167, 0.175, 0.150 y 0.162), y también coincide con 1/6, por la misma razón de normalización. Representa el nivel medio de desempeño en las variables que miden capacidad de movimiento y proyección (D1 a D7): IED, alineación estratégica, sofisticación, exportación, proyectos, tracción e impacto. Los clústeres por encima de la línea, Economía Digital, Hábitat Sostenible y Energía, convierten sus capacidades en tracción de mercado mejor que el conjunto. Los que quedan por debajo, Salud y Biotecnología, Agroindustria y Manufactura Avanzada, tienen capacidades que aún no se traducen en dinamismo. Energía supera el umbral por un margen mínimo, por lo que su clasificación como "Apuesta de Futuro" es sensible a pequeñas variaciones en los datos.

Tamaño y área de los cuadrantes

El área no mide importancia ni potencial. Que el Cuadrante IV se vea grande no significa que haya mucho espacio o riesgo allí; es un efecto del rango del eje.

Lo que sí tiene significado es la distancia de cada clúster a las líneas punteadas. Por ejemplo, Energía está a 0.0005 del umbral de Dinamismo y Salud a 0.004, aunque en la imagen parezca que hay más espacio. Como el eje Y está muy ampliado, esas distancias pequeñas se ven más grandes de lo que son en proporción al total.

El tamaño de las burbujas es uniforme. No representa ninguna variable (por ejemplo, PIB o empleo). Cómo se determina el área:

- Eje X (Madurez): va de 0.08 a 0.36, con el umbral en 0.167. Queda 31 % del ancho a la izquierda y 69 % a la derecha.
- Eje Y (Dinamismo): va de 0.14 a 0.20, con el umbral en 0.167. Queda 44 % de la altura abajo y 56 % arriba.

2.5.6 Resumen Analítico

El siguiente resumen analítico se deriva de la ubicación exacta de los clústeres en esta matriz:

- **Cuadrante I - Líderes Consolidados (Alta Madurez / Alto Dinamismo):** En esta posición dominante se consolidan Economía Digital y Hábitat Sostenible. Estos sectores actúan como los motores principales del ecosistema, demostrando una sólida integración entre variables de PIB, densidad empresarial, talento y tracción en ciencia, tecnología e innovación (CTI). Juntos apalancan la modernización transversal de los demás sectores.

1. Hábitat Sostenible ostenta la mayor base económica instalada del territorio combinada con un dinamismo de proyectos que lo sitúa como el clúster con mayor puntaje global consolidado.
2. Economía Digital se posiciona como el clúster de mayor dinamismo transversal en todo el ecosistema, registrando los niveles más altos en atracción de capital extranjero (IED) y tracción sistémica.

- **Cuadrante II - Apuestas de Futuro (Baja Madurez / Alto Dinamismo):** Este cuadrante está ocupado exclusivamente por el clúster de Energía. Posee una densidad empresarial relativamente concentrada y de menor escala demográfica, lo cual explica su baja madurez relativa. No obstante, supera el umbral crítico de dinamismo, impulsado por una elevada alineación estratégica, capacidad de tracción de mercado y proyectos de innovación. Representa la principal apuesta territorial para la transición energética, descarbonización y tecnologías limpias (CleanTech).
- **Cuadrante III - Rezagados / En Riesgo (Baja Madurez / Bajo Dinamismo):** quí convergen Salud y Biotecnología, Agroindustria junto con Manufactura Avanzada. La ubicación de estos Clusters indican vulnerabilidades estructurales críticas, ya que combinan una baja consolidación de mercado con rezagos en la transformación de sus capacidades hacia una verdadera tracción exportadora e impacto de IED.
  Salud y Biotecnología y Manufactura Avanzada cuentan con los puntajes más altos del ecosistema en Sofisticación Científico-Tecnológica. Sin embargo, se sitúan por debajo del umbral de dinamismo general debido a limitaciones en escala de IED, debilidades en exportación industrial y cuellos de botella regulatorios o de liquidez que frenan su escalamiento comercial.
  Agroindustria exhibe un fuerte desempeño exportador aislado y una densidad relevante de unidades, pero está severamente restringida por una baja generación de valor agregado formal en empleo, menor PIB relativo y baja sofisticación tecnológica.
  La prioridad de política pública aquí no es crear ciencia básica, sino implementar mecanismos de absorción de tecnología, financiación estructurada y aceleración comercial para transferir sus capacidades al mercado.
- **Cuadrante IV - Sectores Tradicionales (Alta Madurez / Bajo Dinamismo):** El hecho de que ningún clúster se ubique en este cuadrante es una señal positiva para el territorio: evidencia que los sectores con masa crítica consolidada (alta madurez) no han caído en el anquilosamiento tecnológico ni en el estancamiento de innovación. Por el contrario, la agenda de competitividad de Medellín y la región debe concentrarse en tender puentes de transferencia para que el talento y las patentes del Cuadrante III escalen hacia los Cuadrantes I y II.

2.6 Entendimiento de retos territoriales CAME

2.6.1 Clasificación retos CAME

La planificación estratégica territorial y la prospectiva de sistemas de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTI) exigen superar las lecturas estáticas que tradicionalmente arrojan las matrices diagnósticas. Si bien las evaluaciones situacionales identifican los activos y las restricciones de un territorio, con frecuencia se quedan en la enumeración aislada de variables. El análisis CAME (Corregir, Afrontar, Mantener, Explotar) se constituye como una metodología operativa orientada a traducir el diagnóstico en líneas de acción integradas, fundamentando la toma de decisiones para el Distrito de CTI de Medellín y el departamento de Antioquia (RutaN, 2026a). En este contexto local, el enfoque propuesto supera la atomización de indicadores y permite estructurar la planificación territorial no como un listado estático de variables, sino como un sistema dinámico de tensiones y capacidades. La sofisticación y reformulación de las descripciones territoriales exige superar la lectura aislada de cuadrantes y articular los cuatro vectores en narrativas complejas de política pública.

El propósito central de este capítulo es explicar la arquitectura técnica detrás del procesamiento de los cuatro ejes estratégicos del Plan del Sistema Distrital de Ciencia, Tecnología e Innovación para la Sostenibilidad 2024–2033: Sostenibilidad Ambiental, Transformación Digital y Gobierno Inteligente, Desarrollo Social-Humano

y Desarrollo Económico (Alcaldía de Medellín, 2025). Para evitar la fragmentación analítica, se adoptó un enfoque de cruce de segundo orden centrado en dos vectores decisionales: Corregir × Afrontar (CxA) y Mantener × Explotar (MxE). Esta decisión metodológica permite sintetizar el universo de interacciones entre el entorno interno y el contexto global en narrativas estructuradas de retos territoriales.

Afrontar: Delimita la Problemática o Necesidad Crítica del territorio, interconectando las deficiencias o vacíos internos con los riesgos y presiones del entorno exógeno.

Estratégico: Delimita la Problemática o Necesidad Crítica del territorio, interconectando las deficiencias o vacíos internos con los riesgos y presiones del entorno exógeno.

2.6.2 Racionalidad y Metodología de los Cruces Estratégicos

La selección de los vectores CxA y MxE no es arbitraria; responde a la necesidad de construir una matriz de intervención que atienda simultáneamente la contención de riesgos sistémicos y la captura de valor en áreas de alta oportunidad, como se muestra en la Figura 8.

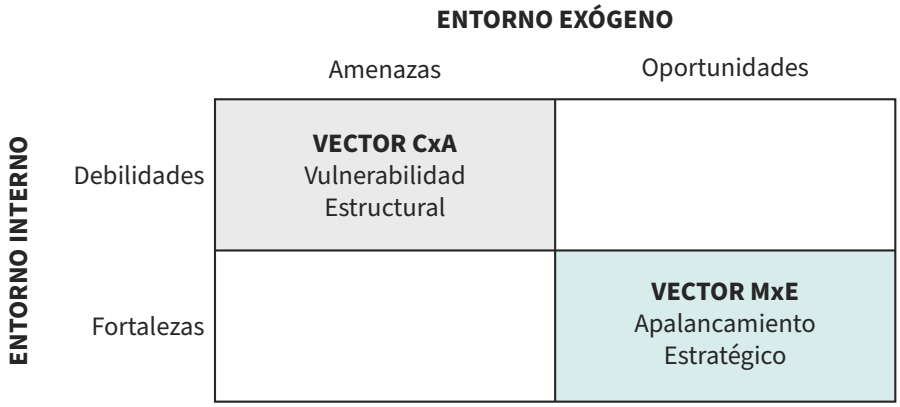


Figura 8: Diagrama con cruce de vector de Vulnerabilidad Estructural: Corregir × Afrontar (CxA) y vector Apalancamiento Estratégico: Mantener × Explotar (MxE). Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

Vector de Vulnerabilidad Estructural: Corregir × Afrontar (CxA). El cruce entre las Debilidades internas y las Amenazas externas delimita la Problemática Crítica y las Necesidades Urgentes del territorio. Este vector responde a la pregunta estratégica: ¿Dónde es más frágil el ecosistema y qué riesgos del entorno pueden detonar un colapso si no se reestructuran los vacíos internos?

Lógica de Integración: La ocurrencia simultánea de una deficiencia interna (como la baja inversión en I+D, la obsolescencia de flotas logísticas o la existencia de silos de información) con una amenaza exógena (fuga de cerebros, episodios críticos de contaminación o ciberdelitos) amplifica la vulnerabilidad sistémica.

Resultado Esperado: Permite priorizar la asignación de recursos públicos e instrumentos de fomento en aquellos cuellos de botella donde la inacción gubernamental representaría los mayores costos económicos y sociales.

Vector de Apalancamiento Estratégico: Mantener × Explotar (MxE). El cruce entre las Fortalezas consolidadas y las Oportunidades globales configura el Potencial de Transformación y las Oportunidades de Escalamiento. Este vector responde a la pregunta estratégica: ¿Cuáles son las capacidades e infraestructuras instaladas que permiten capturar los mercados, tecnologías y fondos internacionales emergentes?

Lógica de Integración: La existencia de ventajas competitivas locales (tales como la red de transporte masivo,

la infraestructura hospitalaria de alta complejidad, la gobernanza universidad-empresa-Estado o la capacidad en Big Data) adquiere verdadero valor cuando se conecta explícitamente con tendencias globales como el financiamiento climático, el *nearshoring*, la bioeconomía o la Inteligencia Artificial.

Resultado Esperado: Define la agenda de internacionalización y atracción de inversión, identificando las plataformas desde las cuales el territorio puede posicionarse como un nodo de soluciones avanzadas a escala global.

2.6.2.1 Sostenibilidad Ambiental

1. Cruce CxA (Corregir × Afrontar): Vector de Vulnerabilidad Estructural. El vector CxA articula las debilidades internas del sistema ambiental con los riesgos y presiones exógenas más severas, definiendo la problemática estructural y las necesidades urgentes que amenazan la sostenibilidad urbana y la salud pública del territorio.

Esta vulnerabilidad integrada abarca cuatro frentes interconectados:

Saturación Crítica y Modelo Lineal de Residuos: La necesidad más apremiante radica en evitar el colapso del sistema regional de saneamiento básico ante el límite de capacidad inminente del relleno sanitario La Pradera, el cual recibe diariamente 3.500 toneladas de residuos. Esta amenaza exógena se agrava por un modelo interno de enterramiento lineal que carece de plantas de valorización para el 55 % de residuos orgánicos recuperables y por la desconexión ciudadana en la separación en la fuente, originada en la falta de incentivos operativos reales y esquemas logísticos eficientes de recolección.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Afrontar (Amenaza):** Saturación de Sitios de Disposición Final (límite de capacidad inminente en La Pradera ante el recibo de 3.500 ton/día).
- **Corregir (Debilidad):** Deficiente Gestión de Residuos (modelo de enterramiento lineal dependiente de La Pradera y falta de plantas de valorización para el 55 % de orgánicos).
- **Corregir (Debilidad):** Desconexión de la Práctica Ciudadana (falta de incentivos operativos e insuficiencia en la narrativa de separación en la fuente).

Obsolescencia Logística y Contaminación del Aire: El territorio enfrenta una grave problemática de calidad del aire causada por la obsolescencia del parque automotor de logística de carga y volquetas, identificados como los mayores emisores de material particulado fino (PM2.5). Superar este cuello de botella exige diseñar instrumentos financieros e inyectar recursos del Fondo Distrital de CTI para cofinanciar la reconversión tecnológica de la flota privada y superar las barreras de capital inicial.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Corregir (Debilidad):** Obsolescencia en Logística de Carga (parque de carga y volquetas como principales fuentes de PM2.5 y presencia de barreras financieras para la renovación).

Vulnerabilidad Ecosistémica y Gestión del Riesgo en Laderas: La presión urbanística informal sobre laderas de alto riesgo amenaza continuamente los servicios ecosistémicos y expone a comunidades vulnerables a desastres socioambientales. Esta amenaza se profundiza por una infraestructura de datos deficiente e imprecisa sobre siniestralidad ambiental y vial —evidenciada en los Informes Policiales de Accidentes de Tránsito (IPAT) desactualizados—, lo que demanda integrar analítica V2X y teledetección satelital conectada al C5 para coordinar respuestas institucionales en tiempo real.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Afrontar (Amenaza):** Presión Urbanística Informal (ocupación no planificada en laderas y degradación de servicios ecosistémicos).
- **Corregir (Debilidad):** Infraestructura de Datos Deficiente (vacíos de información en IPAT y necesidad de analítica V2X y sensores satelitales en la plataforma C5).

Brecha de Eficiencia Energética Industrial: Existe un rezago estructural en el tejido empresarial de menor escala debido a la baja adopción de tecnologías de automatización, monitoreo y climatización eficiente por parte de las Pymes. Los altos costos de inversión inicial exigen que los planes cuatrienales estructuren garantías y créditos de fomento cofinanciados por el sistema de CTI para modernizar la base productiva.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Corregir (Debilidad):** Baja Adopción de Tecnologías de Eficiencia Energética entre Pymes (altos costos iniciales que limitan proyectos de automatización, climatización y monitoreo).

2. Cruce MxE (Mantener $\times$ Explotar): Vector de Apalancamiento Estratégico. El vector MxE conecta los activos e infraestructuras consolidadas del territorio con las tendencias globales emergentes y los marcos normativos de sostenibilidad, configurando las oportunidades de escalamiento y el potencial de liderazgo ambiental del Distrito.

Este potencial de transformación se expande a través de tres pilares de apalancamiento:

Aceleración de la Electromovilidad y Finanzas Verdes Globales: Medellín posee un potencial de posicionamiento internacional fundamentado en su sistema de transporte masivo consolidado (Red Metro y meta de 130 buses eléctricos), la apropiación de la Cultura Metro, el conocimiento técnico exportable en transporte multimodal (férreo y cables) y la red de Zonas Urbanas de Aire Protegido (ZUAP), respaldada por más de 20.000 pruebas de control vehicular. Este activo institucional se conecta directamente con la oportunidad de capturar financiamiento climático internacional y fondos verdes globales, utilizando la evidencia auditable de reducción de emisiones (3.723 toneladas de CO_2 evitadas) para bancabilizar proyectos de expansión de corredores dedicados e infraestructura de carga para carga y pasajeros.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Mantener (Fortaleza):** Sistema de Transporte Masivo Consolidado (Red Metro, meta de 130 buses eléctricos y consolidación de la Cultura Metro).
- **Mantener (Fortaleza):** Infraestructura de Monitoreo Ambiental Avanzada (operación de las ZUAP y más de 20.000 pruebas de control vehicular realizadas).
- **Mantener (Fortaleza):** Conocimiento Técnico Exportable (capacidad técnica acumulada en transporte multimodal, férreo y sistemas de cables).
- **Explotar (Oportunidad):** Financiamiento Climático Internacional (acreditación de 3.723 ton CO_2 evitadas para bancabilizar proyectos ante fondos verdes globales).

Parques Tecnológicos y Ecología Industrial de Residuos: La convergencia entre la capacidad técnica de los Clústeres de Energía y Hábitat Sostenible y la oportunidad de transformar el sitio de disposición final permite migrar de la contingencia hacia un Parque Tecnológico Ambiental. Este espacio funcionará como un laboratorio vivo del Plan Decenal de CTI para ensayar tecnologías de aprovechamiento de plásticos complejos, compostaje industrial y producción de biogás con capacidad para abastecer a 200.000 hogares, financiados mediante el Fondo Distrital de CTI.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Mantener (Fortaleza):** Clústeres Activos en Sostenibilidad (liderazgo y capacidad de diseño técnico de los

Clústeres de Energía y Hábitat Sostenible).

- **Explotar (Oportunidad):** Transformación de Residuos (reconversión de La Pradera en Parque Tecnológico Ambiental y laboratorio vivo para biogás a 200.000 hogares).

Nuevos Mercados de Economía Circular y Materiales Adaptativos: El territorio cuenta con la oportunidad de estructurar un nuevo nicho de desarrollo económico aprovechando la reglamentación de Responsabilidad Extendida del Productor (REP). Este marco normativo permite impulsar emprendimientos de logística inversa (como Visión Circular), modelos de "producto como servicio" e investigación aplicada en nuevos materiales compuestos adaptativos, movilizando el conocimiento de los clústeres locales y los recursos de inversión gestionados (superiores a 1.570 millones de pesos) para escalar la producción circular en la industria urbana.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Mantener (Fortaleza):** Clústeres Activos en Sostenibilidad (investigación aplicada en ecodiseño y capacidades de producción circular).
- **Explotar (Oportunidad):** Exploración de Nuevos Mercados de Economía Circular (aprovechamiento de la norma REP, logística inversa, modelo "producto como servicio" y $1.570 M gestionados para materiales compuestos).

3. Síntesis Consolidada del Reto Territorial Ambiental. De la integración de ambos vectores surge la descripción unificada del reto ambiental del Distrito:

Transicionar de un modelo urbano vulnerable —afectado por el riesgo inminente de saturación del relleno La Pradera (3.500 ton/día), la emisión de PM2.5 por logística obsoleta y la brecha energética en Pymes— hacia un ecosistema de circularidad y movilidad cero emisiones; requiriendo apalancar la infraestructura del Metro, las ZUAP y la capacidad técnica de los Clústeres de Energía y Hábitat Sostenible para capturar financiamiento climático global (3.723 ton CO_2 evitadas) y reconvertir la disposición de residuos en un Parque Tecnológico Ambiental de generación de biogás para 200.000 hogares y nuevos materiales bajo la norma REP.

2.6.2.2 Transformación Digital y Gobierno Inteligente

1. Cruce CxA (Corregir $\times$ Afrontar): Vector de Vulnerabilidad Estructural. El vector CxA articula las debilidades internas del sistema digital con los riesgos y presiones exógenas más severas, definiendo la problemática estructural y las necesidades urgentes que amenazan la competitividad, la ciberseguridad y la soberanía tecnológica del territorio.

Esta vulnerabilidad integrada abarca cuatro frentes interconectados:

Dependencia Tecnológica Exógena y Brecha de Soberanía Digital: La problemática central reside en el riesgo de operar como un consumidor pasivo de tecnología, licencias y software foráneo, lo que genera vulnerabilidad institucional y limita el desarrollo de capacidades e intelectualidad locales. La necesidad urgente es transicionar hacia la soberanía digital implementando la Compra Pública de Innovación (CPI), utilizando al Conglomerado Público como "cliente ancla" para validar y adquirir soluciones GovTech locales, reduciendo la dependencia de proveedores globales.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Afrontar (Amenaza):** Dependencia tecnológica externa (riesgo de operar como consumidor pasivo de tecnología foránea y licencias globales).
- **Mantener (Fortaleza):** Herramienta de Innovación GovTech (uso del Conglomerado Público como cliente validador para reducir el riesgo comercial de soluciones locales).

Ciberseguridad y Protección de Infraestructuras Críticas: El acelerado proceso de digitalización expone a la administración pública y al tejido ciudadano a crecientes riesgos de ciberdelitos y ataques a infraestructuras críticas e información sensible. Superar esta necesidad crítica requiere desarrollar protocolos de seguridad avanzados e institucionalizar la Central Estratégica contra Ciberdelitos (CECIB) dentro de los proyectos estratégicos de la ciudad para salvaguardar la confianza ciudadana.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Afrontar (Amenaza):** Riesgos de Ciberseguridad (vulnerabilidad ante ciberdelitos en infraestructuras críticas y bases de datos sensibles).

Fragmentación Institucional e Interoperabilidad Limitada de Datos: Existe una debilidad estructural por la presencia de silos de información en las dependencias públicas que impiden el flujo articulado de datos entre los sistemas de movilidad, salud y hacienda. La necesidad territorial implica definir una arquitectura de datos común y obligatoria desde la Secretaría de Desarrollo Económico y Planeación que establezca estándares de interoperabilidad para habilitar una gestión pública basada en evidencia.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Corregir (Debilidad):** Interoperabilidad limitada (silos de información entre movilidad, salud y hacienda que impiden una gestión pública coordinada y eficiente).

Exclusión Digital Educativa, Brecha de Talentos y Baja Madurez en MiPymes: El territorio enfrenta una profunda brecha de capital humano y adopción tecnológica, evidenciada en la exclusión digital en el 90 % de las sedes educativas oficiales, la baja madurez digital en microempresas y un déficit crítico de talento en Inteligencia Artificial, analítica y bilingüismo. Se requiere ejecutar programas masivos de conectividad escolar, programas de extensión e intensivos de formación ágil (*bootcamps*, escuelas de IA y microcredenciales financiadas por Sapiencia y Ruta N) para alinear el talento local con la demanda del sector productivo.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Corregir (Debilidad):** Baja Madurez Digital en MiPymes (adopción básica en microempresas y necesidad de diagnósticos e instrumentos de gestión/analítica).
- **Corregir (Debilidad):** Deficiente conectividad escolar (exclusión digital en el 90 % de las sedes educativas oficiales).
- **Corregir (Debilidad):** Déficit de talento especializado (escasez crítica de perfiles en IA, analítica de datos y bilingüismo).

2. Cruce MxE (Mantener × Explotar): Vector de Apalancamiento Estratégico. El vector MxE conecta las capacidades tecnológicas e infraestructuras públicas consolidadas con las oportunidades emergentes en mercados globales e Inteligencia Artificial, definiendo las oportunidades de escalamiento y el potencial de liderazgo digital del Distrito.

Este potencial de transformación se expande a través de tres pilares de apalancamiento:

Ecosistema de Capital de Riesgo, Mercado GovTech e Internacionalización DeepTech: Medellín cuenta con la oportunidad de posicionar y exportar sus plataformas cívicas y soluciones de tecnología profunda a otras urbes emergentes, apalancando el dinamismo del ecosistema de *startups* y Ruta N respaldado por más de $100.000 millones destinados a *Venture Capital*, CTI y GovTech para 2025. Este activo se potencia al consolidar el Conglomerado Público como cliente ancla que valida soluciones locales (como Vota PP), utilizando la estrategia de internacionalización y la marca ciudad para atraer Inversión Extranjera Directa (IED) en DeepTech.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Mantener (Fortaleza):** Posicionamiento como *Hub* de innovación (dinamismo de *startups*, articulación con Ruta N y gestión de >$100.000 M para *Venture Capital*, CTI y GovTech).
- **Mantener (Fortaleza):** Herramienta de Innovación GovTech (Conglomerado Público como cliente ancla y validador de soluciones locales como Vota PP).
- **Explotar (Oportunidad):** Atracción de Inversión Extranjera Directa (IED) en DeepTech (comercialización e internacionalización de plataformas cívicas locales).

Infraestructura C5, Big Data Territorial y Gobernanza de IA: El territorio tiene el potencial de transformar la productividad empresarial integrando herramientas de IA generativa y automatización cognitiva en pymes y grandes industrias. Esta oportunidad se apalanca en la infraestructura de monitoreo existente (red C5 y videovigilancia con cámaras LPR) y en la capacidad avanzada de procesamiento de Big Data en tiempo real del Sistema de Inteligencia Turística, convirtiendo los datos de movilidad y comportamiento en insumos estratégicos para la toma de decisiones y el escalamiento productivo.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Mantener (Fortaleza):** Infraestructura de monitoreo del espacio público (Red C5 y cámaras LPR para la gestión de seguridad y movilidad en tiempo real).
- **Mantener (Fortaleza):** Integración de datos y sistemas de información para personalizar servicios (Big Data en tiempo real y Sistema de Inteligencia Turística).
- **Explotar (Oportunidad):** Gobernanza Tecnológica e IA (adopción de IA generativa y automatización cognitiva para la eficiencia operativa empresarial).

Banca de Pruebas Urbanas mediante *Living Labs*: La convergencia entre el flujo de visitantes y la presión en movilidad ofrece la oportunidad de habilitar laboratorios vivos urbanos. Este espacio permite a las empresas tecnológicas probar drones, robótica y tecnologías inmersivas en entornos reales con la población flotante, validando las soluciones técnicamente antes de escalarlas como políticas públicas de ciudad.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Explotar (Oportunidad):** Laboratorio Vivo (*Living Lab*) (habilitación de zonas para la prueba de tecnologías inmersivas, drones y robótica).

3. Síntesis Consolidada del Reto Territorial de Transformación Digital. De la integración de ambos vectores surge la descripción unificada del reto digital del Distrito:

Evolucionar de un modelo de adopción pasiva y fragmentada de tecnología —afectado por la dependencia de licencias foráneas, la vulnerabilidad en ciberseguridad, la existencia de silos de información, la exclusión digital en el 90 % de colegios y el déficit de talento en IA y pymes— hacia un ecosistema de soberanía digital y gobernanza tecnológica orientada al valor agregado; requiriendo institucionalizar la Compra Pública de Innovación (CPI) y apalancar el capital de $100.000 M en *Venture Capital*, el rol de cliente ancla del Conglomerado Público (GovTech) y la infraestructura del C5 y *Big Data* turístico para desplegar *Living Labs*, formar talento en IA y bilingüismo mediante Sapiencia y Ruta N, e implementar la Central Estratégica contra Ciberdelitos (CECIB).

2.6.2.3 Desarrollo Social-Humano

1. Cruce CxA (Corregir × Afrontar): Vector de Vulnerabilidad Estructural. El vector CxA articula las debilidades internas del sistema de desarrollo social con las amenazas exógenas sobre el talento, definiendo

la problemática estructural y las necesidades urgentes que afectan el bienestar, la equidad de género y la retención del capital humano especializado.

Esta vulnerabilidad integrada abarca cuatro frentes interconectados:

Fuga de Talento Científico, Baja Inversión en I+D y Desconexión con la Industria: La problemática central reside en la pérdida continua de científicos, doctores e investigadores de alto nivel que migran ante la falta de inserción laboral en el sector productivo y la escasa inversión regional en I+D (que se mantiene por debajo del 1 % del PIB). La necesidad urgente es reestructurar el sistema de incentivos tributarios locales y utilizar el Fondo Distrital de CTI para cofinanciar proyectos de investigación aplicada con empresas, financiando becas doctorales y postdoctorales ancladas a desafíos industriales reales para retener y vincular el talento especializado.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Afrontar (Amenaza):** Fuga de talento científico (migración de investigadores por falta de inserción laboral e incentivos industriales).
- **Corregir (Debilidad):** Baja inversión en I+D (inversión regional inferior al 1 % del PIB y necesidad de cofinanciación pública-privada en investigación aplicada).

Insuficiente Respuesta Institucional frente a la Crisis de Salud Mental: El territorio enfrenta una severa necesidad social ante el incremento de afecciones de bienestar emocional y la limitada capacidad de respuesta de la red pública tradicional. Esta problemática exige corregir la desconexión entre la tecnología médica avanzada y la salud psicosocial, integrando plataformas de telepsicología y herramientas de detección temprana potenciadas con Inteligencia Artificial conectadas a la red pública de “Escuchaderos”.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Corregir (Debilidad):** Insuficiente respuesta institucional frente a Crisis de salud mental (desconexión entre tecnología médica y atención psicosocial, requiriendo telepsicología e IA en los Escuchaderos).

Brecha de Pertinencia Curricular y Desalineación con el Mercado Tecnológico: Existe una debilidad estructural por la desalineación entre los contenidos educativos en educación media y técnica frente a los requerimientos de los clústeres de conocimiento. La necesidad territorial es reformar transversalmente los currículos incorporando el enfoque STEAM e intensificando el aprendizaje del inglés para garantizar la pertinencia formativa y elevar la empleabilidad de los jóvenes en la economía digital.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Corregir (Debilidad):** Desconexión en la pertinencia curricular (brecha entre la formación tradicional y las demandas de los clústeres tecnológicos en inglés y habilidades STEAM).

Inequidad Laboral de Género y Sobrecarga no Remunerada en Cuidados: Las barreras de acceso al empleo formal para las mujeres, agravadas por la sobrecarga no remunerada en tareas domésticas y de cuidado, limitan la equidad de género en el mercado laboral. Se requiere implementar políticas activas de empleo con cupos garantizados en la industria tecnológica para mujeres, articulando estas oportunidades con la infraestructura del Sistema Distrital de Cuidado para liberar tiempo y brindar soporte operativo.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Corregir (Debilidad):** Inequidad laboral de género (altas tasas de desempleo femenino por falta de soporte en cuidados y brecha de acceso al sector tecnológico).

2. Cruce MxE (Mantener × Explotar): Vector de Apalancamiento Estratégico. El vector MxE conecta las fortalezas consolidadas en salud, gobernanza y monitoreo social con las oportunidades de innovación, formación ágil y biotecnología, definiendo las oportunidades de escalamiento y el potencial de desarrollo humano del Distrito.

Este potencial de transformación se expande a través de cuatro pilares de apalancamiento:

Polo Internacional de Biotecnología, Ensayos Clínicos y Salud Digital: Medellín cuenta con el potencial estratégico de consolidarse como un nodo global de biotecnología, desarrollo de dispositivos médicos y ensayos clínicos, apalancando la reputación internacional de su infraestructura hospitalaria de alta complejidad (con facturación de $34.000 millones a pacientes internacionales en 2024 en oncología y trasplantes). Este activo se potencia al convertir a los hospitales de alta tecnología en laboratorios vivos de validación clínica, agilizando la regulación local para atraer capital e investigación biotecnológica internacional.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Mantener (Fortaleza):** Industria de salud consolidada y competitiva internacionalmente (excelencia clínica en trasplantes y oncología con facturación internacional de $34.000 M).
- **Explotar (Oportunidad):** Biotecnología y Salud Digital (uso de infraestructura hospitalaria para ensayos clínicos, validación de dispositivos médicos y atracción de biotecnología).

Ecosistema de Formación Ágil STEAM, Bootcamps e Hiperpersonalización Curricular: La oportunidad de acelerar la generación de talento en programación e Inteligencia Artificial se apalanca en la gobernanza colaborativa del ecosistema institucional (Ruta N, Sapiencia, CUEE y el Grupo G8). Esta fortaleza permite co-diseñar programas de formación de ciclo corto (*bootcamps*) y microcredenciales hiperpersonalizadas en alianza con tecnológicas globales (Google, AWS), respondiendo ágilmente a la demanda del sector productivo.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Mantener (Fortaleza):** Ecosistema Institucional sólido (gobernanza activa CUEE, G8, Ruta N y Sapiencia para la validación de políticas públicas).
- **Explotar (Oportunidad):** Hiperpersonalización curricular con enfoque STEAM (escalamiento de *bootcamps* y microcredenciales en IA/programación con alianzas globales como Google y AWS).

Economía del Cuidado Profesionalizada mediante Tecnologías Asistivas: El territorio tiene la oportunidad de estructurar una Economía del Cuidado altamente profesionalizada mediante la incorporación de tecnologías asistivas y robótica básica. Este desarrollo permite optimizar y dignificar las labores de cuidado, liberando tiempo de trabajo no remunerado para las mujeres e integrándolas formalmente a nuevos nichos de empleo tecnológico y de servicios asistenciales.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Explotar (Oportunidad):** Aprovechamiento de tecnologías asistivas en la economía del cuidado (uso de robótica básica y herramientas digitales para profesionalizar el cuidado y liberar tiempo femenino).

Monitoreo Social Basado en Evidencia y Focalización contra la Vulnerabilidad: La capacidad técnica del Análisis de Situación de Salud (ASIS) para diagnosticar la desnutrición y problemáticas de salud pública constituye un activo fundamental para la inversión social. Esta fortaleza se conecta con la oportunidad de estructurar intervenciones focalizadas en puntos críticos de vulnerabilidad (como el programa “Medellín Cero Hambre”), asegurando que la asignación de recursos públicos responda a datos duros y no a supuestos.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Mantener (Fortaleza):** Sistema de monitoreo social (Salud pública) (capacidad técnica del ASIS para

orientar programas como “Medellín Cero Hambre” con evidencia).

3. Síntesis Consolidada del Reto Territorial de Desarrollo Social-Humano. De la integración de ambos vectores surge la descripción unificada del reto social del Distrito:

Evolucionar desde un modelo afectado por la fuga de talento científico, una inversión en I+D inferior al 1 % del PIB, vacíos institucionales en salud mental, desalineación curricular y brechas laborales de género, hacia un ecosistema de desarrollo humano basado en el conocimiento, la equidad y la excelencia médica; requiriendo apalancar la industria hospitalaria de alta complejidad ($34.000 M facturados a internacionales), el sistema de monitoreo ASIS y la gobernanza del CUEE-G8-Sapiencia-Ruta N para estructurar doctorados industriales que retengan el talento, escalar la biotecnología y ensayos clínicos, desplegar IA en la red de salud mental (Escuchaderos), e impulsar la economía del cuidado con tecnologías asistivas y *bootcamps* STEAM respaldados por alianzas globales (Google, AWS).

2.6.2.4 Desarrollo Económico

1. Cruce CxA (Corregir × Afrontar): Vector de Vulnerabilidad Estructural. El vector CxA articula las debilidades internas del aparato productivo local con los riesgos y presiones exógenas más severas, definiendo la problemática estructural y las necesidades urgentes que amenazan la sostenibilidad económica, la equidad territorial y la competitividad internacional.

Esta vulnerabilidad integrada abarca cuatro frentes interconectados:

Riesgo de Estancamiento Competitivo y Baja Sofisticación Tecnológica: La problemática central reside en el riesgo de quedar atrapado en un modelo económico que compite por mano de obra barata y actividades de bajo valor agregado, debido a la concentración de emprendimientos en software básico. La necesidad urgente exige reorientar la oferta institucional de Ruta N hacia tecnologías profundas (*Deep Tech* —biotecnología, *hardware* y tecnología cuántica—) para migrar hacia sectores intensivos en conocimiento y basados en la innovación.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Afrontar (Amenaza):** Estancamiento competitivo (riesgo derivado de la alta dependencia de sectores intensivos en mano de obra barata).
- **Corregir (Debilidad):** Baja sofisticación tecnológica (*Deep Tech*) (insuficiencia de emprendimientos en tecnologías profundas y necesidad de líneas de capital de riesgo específicas en Ruta N).

Gentrificación, Presión Socioeconómica por Nómadas Digitales y Desequilibrio Urbano: La creciente llegada de nómadas digitales y población flotante global genera presión sobre el costo de vida y altera el tejido social en las zonas céntricas. La necesidad territorial es mitigar la gentrificación mediante el uso de inteligencia de datos turísticos para descentralizar los flujos de visitantes hacia barrios y corregimientos, distribuyendo los beneficios económicos y protegiendo a las comunidades locales.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Afrontar (Amenaza):** Gentrificación por Nómadas Digitales (aumento del costo de vida y presión sobre el tejido social urbano).
- **Corregir (Debilidad):** Agroindustria primaria y brecha territorial (desconexión entre el auge turístico-servicial urbano y el desarrollo productivo de los corregimientos).

Baja Adopción Tecnológica y Brecha de Productividad en MiPymes: Existe una debilidad estructural por la escasa transferencia de tecnología hacia las micro, pequeñas y medianas empresas, lo que profundiza la

brecha de productividad frente a los grandes actores industriales. Se requiere estructurar programas donde grandes empresas "tractoras" transfieran buenas prácticas y estándares a proveedores locales, respaldados por incentivos tributarios y mecanismos de compra pública.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Corregir (Debilidad):** Baja adopción tecnológica MiPymes (falta de puentes de proveeduría y transferencia tecnológica desde empresas tractoras).
- **Afrontar (Amenaza):** Estancamiento competitivo (vulnerabilidad de las pequeñas empresas para integrarse a cadenas de valor sofisticadas).

Vulnerabilidad Externa, Concentración de Commodities y Agroindustria Primaria Sin Valor Agregado: El territorio enfrenta un elevado riesgo de vulnerabilidad exógena por la dependencia comercial de mercados tradicionales (como EE. UU.), la volatilidad de los *commodities* y una base agrícola rural orientada a la producción primaria. La necesidad crítica implica implementar biofábricas y centros de agregación de valor en corregimientos para procesar materias primas mediante biotecnología, transformándolas en ingredientes funcionales y bioproductos exportables.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Afrontar (Amenaza):** Incertidumbre Global (vulnerabilidad por dependencia comercial de Estados Unidos, volatilidad de *commodities* y choques en la cadena de suministros).
- **Corregir (Debilidad):** Agroindustria primaria (predominio de producción agrícola básica sin transformación ni agregación de valor biotecnológico).

2. Cruce MxE (Mantener × Explotar): Vector de Apalancamiento Estratégico. El vector MxE conecta las fortalezas consolidadas del ecosistema emprendedor e industrial con las oportunidades de inversión y mercados globales emergentes, definiendo las oportunidades de escalamiento y el potencial de desarrollo económico del Distrito.

Este potencial de transformación se expande a través de cuatro pilares de apalancamiento:

Atracción de Inversión Extranjera Directa (*Nearshoring*) y Servicios Avanzados: Medellín cuenta con la oportunidad estratégica de capturar la relocalización de operaciones globales (*nearshoring*) y centros de servicios compartidos, apalancando el dinamismo del sector servicios (crecimiento turístico del 23 %), la promoción de la ACI y la gobernanza de Ruta N respaldada por más de $100.000 millones gestionados para fomento. Se requiere ofrecer incentivos condicionados a la transferencia tecnológica y al desarrollo de proveedores locales.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Mantener (Fortaleza):** Dinamismo sector Servicios (crecimiento turístico del 23 %, atracción de eventos y promoción a través de la ACI).
- **Mantener (Fortaleza):** Ecosistema emprendedor tecnológico y de innovación en consolidación (articulación de Ruta N y gestión de $100.000 M para fomento).
- **Explotar (Oportunidad):** Atracción de Inversión (IED): *Nearshoring* y Servicios (instalación de centros de servicios y manufactura con exigencia de transferencia tecnológica).

Bioeconomía, Agregación de Valor Rural y Cadenas Globales de Alto Valor: La convergencia entre la biodiversidad regional y las capacidades de investigación del territorio abre la oportunidad de crear *spin-offs* y bioproductos de alto valor agregado. Este activo conecta la base productiva rural con las industrias farmacéutica y cosméticas internacionales, garantizando la propiedad intelectual local y la diversificación de

la canasta exportable.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Mantener (Fortaleza):** Resiliencia Industrial y Clústeres (base industrial competitiva y capacidades de investigación aplicada).
- **Explotar (Oportunidad):** Bioeconomía y Agroindustria (capitalización de la biodiversidad para crear bioproductos y conectar el campo con mercados globales).

Turismo Inteligente, Nómadas Digitales y Exportación de Economía Naranja: El flujo de visitantes y nómadas digitales representa una oportunidad para potenciar la Economía Naranja y aumentar el gasto promedio por turista. Esta estrategia se apalanca en el Sistema de Inteligencia Turística (SIT) para crear experiencias de metaverso urbano y realidad aumentada en sitios patrimoniales, junto con la digitalización de servicios culturales y la profesionalización del talento en bilingüismo.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Mantener (Fortaleza):** Dinamismo sector Servicios (uso de datos del Sistema de Inteligencia Turística para segmentar visitantes de alto valor).
- **Explotar (Oportunidad):** Turismo Inteligente (despliegue de metaverso urbano y realidad aumentada en patrimonio).
- **Explotar (Oportunidad):** Nómadas Digitales (alineación de la oferta cultural local para la exportación de servicios *in situ* y Economía Naranja).

Internacionalización y Sofisticación de Clústeres Industriales Tradicionales: El territorio posee una base industrial y de moda altamente resiliente. La oportunidad consiste en escalar la competitividad de estos clústeres apoyando su inserción en mercados globales, mejorando su eficiencia operativa y facilitando su reconversión tecnológica para integrarse con los nuevos sectores de conocimiento.

Elementos del CAME que componen esta definición:

- **Mantener (Fortaleza):** Resiliencia Industrial y Clústeres (respaldo a la base industrial competitiva en manufactura y moda).
- **Explotar (Oportunidad):** Atracción de Inversión y Desarrollo de Proveedores (integración con cadenas globales de valor).

3. Síntesis Consolidada del Reto Territorial de Desarrollo Económico. De la integración de ambos vectores surge la descripción unificada del reto económico del Distrito:

Evolucionar desde un modelo productivo expuesto a la competencia por mano de obra barata, la dependencia de *commodities*, la agroindustria primaria y la gentrificación turística, hacia una economía basada en el conocimiento, la bioeconomía y el *Deep Tech*; requiriendo apalancar el dinamismo del sector servicios (23 % de crecimiento turístico), la gobernanza de Ruta N (>$100.000 M gestionados) y la resiliencia de los clústeres industriales para atraer Inversión Extranjera Directa (*nearshoring*), desarrollar bioproductos en corregimientos mediante biofábricas, cerrar la brecha tecnológica en MiPymes mediante empresas tractoras, y potenciar el Turismo Inteligente y la Economía Naranja con el Sistema de Inteligencia Turística.

2.6.2.5 Resumen de los 30 Retos Territoriales y Enfoque CAME

Área 1: Sostenibilidad Ambiental (SA)

R01 Saturación Crítica y Modelo Lineal de Residuos (C/A)

R02 Obsolescencia Logística y Contaminación del Aire (C/A)

R03 Vulnerabilidad Ecosistémica y Gestión del Riesgo en Laderas (C/A)

R04 Brecha de Eficiencia Energética Industrial (C/A)

R05 Aceleración de la Electromovilidad y Finanzas Verdes Globales (E/M)

R06 Parques Tecnológicos y Ecología Industrial de Residuos (E/M)

R07 Nuevos Mercados de Economía Circular y Materiales Adaptativos (E/M)

Área 2: Transformación Digital y Gobierno Inteligente (TD)

R08 Dependencia Tecnológica Exógena y Brecha de Soberanía Digital (C/A)

R09 Ciberseguridad y Protección de Infraestructuras Críticas (C/A)

R10 Fragmentación Institucional e Interoperabilidad Limitada de Datos (C/A)

R11 Exclusión Digital Educativa, Brecha de Talentos y Baja Madurez en MiPymes (C/A)

R12 Ecosistema de Capital de Riesgo, Mercado GovTech e Internacionalización DeepTech (E/M)

R13 Infraestructura C5, Big Data Territorial y Gobernanza de IA (E/M)

R14 Banca de Pruebas Urbanas mediante *Living Labs* (E/M)

Área 3: Desarrollo Social-Humano (DS)

R15 Fuga de Talento Científico, Baja Inversión en I+D y Desconexión con la Industria (C/A)

R16 Insuficiente Respuesta Institucional frente a la Crisis de Salud Mental (C/A)

R17 Brecha de Pertinencia Curricular y Desalineación con el Mercado Tecnológico (C/A)

R18 Inequidad Laboral de Género y Sobrecarga no Remunerada en Cuidados (C/A)

R19 Polo Internacional de Biotecnología, Ensayos Clínicos y Salud Digital (E/M)

R20 Ecosistema de Formación Ágil STEAM, Bootcamps e Hiperpersonalización Curricular (E/M)

R21 Economía del Cuidado Profesionalizada mediante Tecnologías Asistivas (E/M)

R22 Monitoreo Social Basado en Evidencia y Focalización contra la Vulnerabilidad (E/M)

Área 4: Desarrollo Económico (DE)

R23 Riesgo de Estancamiento Competitivo y Baja Sofisticación Tecnológica (C/A)

R24 Gentrificación, Presión Socioeconómica por Nómadas Digitales y Desequilibrio Urbano (C/A)

R25 Baja Adopción Tecnológica y Brecha de Productividad en MiPymes (C/A)

R26 Vulnerabilidad Externa, Concentración de Commodities y Agroindustria Primaria Sin Valor Agregado (C/A)

R27 Atracción de Inversión Extranjera Directa (*Nearshoring*) y Servicios Avanzados (E/M)

R28 Bioeconomía, Agregación de Valor Rural y Cadenas Globales de Alto Valor (E/M)

R29 Turismo Inteligente, Nómadas Digitales y Exportación de Economía Naranja (E/M)

R30 Internacionalización y Sofisticación de Clústeres Industriales Tradicionales (E/M)

2.6.3 Priorización de clústeres por medio de retos CAME

La consolidación del Distrito de Ciencia, Tecnología e Innovación de Medellín exige superar la asignación inercial o fragmentada de recursos públicos y privados, transitando hacia una planificación fundamentada en el acoplamiento real entre las capacidades instaladas del territorio y las demandas estructurales de su desarrollo. Para responder a este propósito, el presente capítulo articula el portafolio de los seis clústeres territoriales homologados bajo grupos industriales GICS y dominios OMPI, que agrupan 260 capacidades en ciencia, tecnología, emprendimiento y producción, con los 30 retos estratégicos territoriales derivados del análisis CAME en cuatro dimensiones: Sostenibilidad Ambiental, Transformación Digital y Gobierno Inteligente, Desarrollo Social-Humano y Desarrollo Económico. Cabe resaltar que estas 260 capacidades hacen referencia a menciones (capacidades asignadas a diferentes dominios) de las 150 capacidades distintas de la región.

La metodología de priorización de sectores productivos clave en las economías locales combina un modelo cuantitativo de interdependencia estructural (Método de Rasmussen sobre matrices insumo-producto estimadas vía Método RAS) con un contraste cualitativo (análisis de percepción y alineación con la política estratégica territorial). Originalmente, los coeficientes de Poder de Dispersión (PD_j) y Sensibilidad de Dispersión (SD_i) comparan el desempeño de cada sector frente al promedio global de todos los sectores evaluados, fijando el umbral de corte en 1. Esto permite evaluar cada clúster no de forma aislada, sino midiendo cuánto supera (> 1) o queda por debajo (< 1) de la madurez promedio de los seis clústeres del territorio. Por ejemplo, el índice (PD_j) mide la fuerza de arrastre en función del tamaño de mercado y el desempeño comercial, mientras que el (SD_i) lo hace en función del empleo, el talento humano y la dinámica laboral (Tapia et al., 2024) .

El estudio de (Tapia et al., 2024) propone un modelo de priorización híbrido que combina la estructura matemática de encadenamientos multisectoriales con la validación cualitativa del entorno territorial. Dado que tus insumos combinan narrativas descriptivas y cifras puntuales sobre seis clústeres y tres verticales de madurez (en lugar de una matriz macroeconómica de transacciones intermedias del Banco Central), la adaptación metodológica consiste en traducir la lógica de índices relativos respecto al promedio del ecosistema y la clasificación en cuatro cuadrantes de dispersión a un modelo matricial multicriterio. Para aplicar esta lógica al cruce entre los seis clústeres territoriales (grupos industriales + capacidades OMPI) y el diagnóstico CAME (retos en las cuatro áreas de desarrollo), es necesario traducir el modelo econométrico de flujos insumo-producto a una matriz relacional de incidencia semántica y funcional.

2.6.4 Fundamento del Documento Base

El artículo fundamenta la priorización en dos pilares complementarios que evitan tomar decisiones basadas únicamente en el peso aislado de un sector:

- **Componente Cuantitativo Estructural (Método RAS y Coeficientes de Rasmussen):** A partir de una Matriz Insumo-Producto ajustada iterativamente por filas y columnas (Método RAS) y su respectiva Matriz Inversa de Leontief ($\mathbf{L}$), el modelo cuantifica los impactos directos e indirectos entre sectores mediante dos métricas normalizadas respecto al promedio global del sistema:

    1. **Poder de Dispersión (PD_j) o Encadenamiento hacia atrás (BLR):** Mide la extensión relativa en que un aumento en la demanda de un sector j se dispersa y arrastra al resto del sistema productivo (cuánto demanda o tracciona de los demás):

$$PD_j = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} l_{ij}}{\frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} l_{ij}} \tag{8}$$

    2. **Sensibilidad de Dispersión (SD_i) o Encadenamiento hacia adelante (FLR):** Expresa en qué medida el sistema general pesa o depende del sector como proveedor o habilitador ante el crecimiento

global:

$$SD_i = \frac{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} l_{ij}}{\frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} l_{ij}} \tag{9}$$

- **Componente Cualitativo y Normativo (Contraste y Equidad):** Los autores advierten que los modelos matemáticos explican solo parcialmente la realidad territorial. Por ello, contrastan los coeficientes con el análisis de percepción de actores locales y evalúan su articulación con el direccionamiento estratégico de política pública, integrando criterios de bienestar social y equidad ("justicia *maximin*") para lograr un desarrollo integral, territorial y sostenible.

2.6.5 Traducción Metodológica: Del Flujo Económico al Cruce Textual (Clústeres vs. CAME)

Dado que los insumos son textos descriptivos, los flujos monetarios (z_{ij}) se reemplazan por pesos de acoplamiento funcional entre la oferta de capacidades del territorio (Clústeres + OMPI) y la demanda de soluciones del entorno (Retos CAME en las cuatro áreas).

El sistema se modela construyendo una matriz rectangular de incidencia donde las filas son los Clústeres Territoriales (evaluados desde sus sectores y capacidades de innovación OMPI) y las columnas (j) son los Retos CAME agrupados en las cuatro áreas temáticas. Adicionalmente, se evalúa la sinergia inter-clúster:

- **Adaptación de la Sensibilidad de Dispersión (SD_i) (Capacidad Habilitadora / *Push*):** Mide qué tanto las capacidades OMPI y sectores de un clúster sirven como "insumo transversal" para resolver múltiples retos CAME a lo largo de las cuatro áreas. Un clúster con $SD_i > 1$ tiene un efecto hacia adelante superior al promedio: es indispensable para destrabar problemas y explotar oportunidades regionales.
- **Adaptación del Poder de Dispersión (PD_j) (Tracción Ecosistémica / *Pull*):** Mide qué tanto la activación de un clúster j (al abordar sus retos específicos) exige y moviliza capacidades de otros clústeres o impacta simultáneamente múltiples dimensiones del desarrollo. Un clúster con $PD_j > 1$ contiene un efecto de arrastre hacia atrás superior al promedio: dinamiza todo el ecosistema cuando se invierte en él.

2.6.6 Propuesta de Evaluación y Puntuación para el Cruce de Textos

Para ejecutar este modelo se aplica un protocolo en tres fases que emula el flujo del artículo (Estimación de matriz → Cálculo de dispersión → Contraste estratégico):

1. **Puntuación de Acoplamiento Semántico-Funcional (a_{ij}, en escala 0 a 3):** Por cada cruce entre un Clúster i y un Reto CAME j, se evalúa el texto asignando:
   - **0 (Nulo):** Sin relación funcional ni temática.
   - **1 (Indirecto/Débil):** El clúster aporta tangencialmente al reto, pero no posee las capacidades OMPI centrales para resolverlo.
   - **2 (Directo/Moderado):** Los sectores del clúster están vinculados directamente con la problemática u oportunidad descrita.
   - **3 (Estructural/Fuerte):** *Match* exacto; las capacidades de innovación OMPI del clúster son el habilitador directo para ejecutar la acción CAME.
2. **Ponderadores de Contraste Cualitativo y Equidad Territorial (w_j):** Para incorporar el enfoque de desarrollo integral, sostenible y de equidad social del estudio, los retos no tendrán un peso plano. Las columnas se ponderan según:

- **Naturaleza CAME:** Priorizando los retos de urgencia estructural (Corregir debilidades / Afrontar amenazas críticas) y los de alto potencial (Explotar oportunidades) frente a los de inercia (Mantener fortalezas).
- **Equilibrio de las 4 Áreas:** Asegurando que un clúster que impacte simultáneamente Sostenibilidad Ambiental, Transformación Digital, Desarrollo Social-Humano y Desarrollo Económico reciba una bonificación de integralidad, evitando sesgos puramente economicistas.

3. **Normalización tipo RAS / Leontief:** Se calculan los promedios por fila (capacidad del clúster de impactar los retos de las cuatro áreas) y los encadenamientos de sinergia con los demás clústeres, dividiéndolos por la media global de la matriz para obtener las coordenadas exactas y graficar los seis clústeres en los cuatro cuadrantes.

2.7 Resultados contexto territorial

La arquitectura estratégica de los documentos cargados estructura el cruce entre la vocación productiva y científica del territorio (seis clústeres integrados bajo taxonomías GICS y dominios OMPI, que consolidan 260 capacidades en total) y la hoja de ruta de política pública (análisis CAME distribuido en cuatro dimensiones estratégicas y 30 líneas de acción). Estas 260 asignaciones de capacidades están distribuidas en cuatro dimensiones: Ciencia (127 asignaciones; 48,85 %), Emprendimiento (75 asignaciones; 28,85 %), Tecnología (47 asignaciones; 18,08 %) y Producción (11 asignaciones; 4,23 %). Al depurar las 110 repeticiones transversales de capacidades compartidas entre dos o más clústeres, el portafolio neto del territorio asciende exactamente a 150 capacidades de innovación OMPI únicas.

A continuación, se presenta la síntesis estructural de los insumos recibidos y su matriz de convergencia directa para orientar el ejercicio que se desarrolla:

1. Síntesis de los 6 Clústeres y sus Capacidades.

- **Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida (62 capacidades):** Fuerte concentración científica (49 en Ciencia, 6 en Tecnología, 6 en Emprendimiento, 1 en Producción). Articula infraestructura hospitalaria de alta complejidad con salud digital, genómica, bioinformática y manufactura farmacéutica para modelos asistenciales descentralizados y terapias avanzadas.
- **Manufactura Avanzada y Materiales (59 capacidades):** Distribución equilibrada en el ciclo productivo (29 en Ciencia, 12 en Tecnología, 12 en Emprendimiento, 6 en Producción). Cataliza la reindustrialización mediante automatización, sistemas ciberfísicos, materiales compuestos sostenibles, movilidad eléctrica y logística multimodal.
- **Hábitat Sostenible y Estilo de Vida (46 capacidades):** Tracción emprendedora y tecnológica (12 en Ciencia, 12 en Tecnología, 21 en Emprendimiento, 1 en Producción). Converge en diseño urbano, construcción ecoeficiente, modernización energética de edificaciones, digitalización inmobiliaria y bienes de consumo bajo parámetros de economía circular.
- **Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos (34 capacidades):** Predominio emprendedor (6 en Ciencia, 6 en Tecnología, 21 en Emprendimiento, 1 en Producción). Pivote transversal hacia arquitecturas en la nube, servitización, soberanía tecnológica y exportación de propiedad intelectual.
- **Agroindustria, Alimentos y Nutrición (31 capacidades):** Base científico-tecnológica paritaria (12 en Ciencia, 11 en Tecnología, 7 en Emprendimiento, 1 en Producción). Enfocada en seguridad alimentaria, genética de insumos, procesamiento avanzado, bioeconomía circular (valorización de subproductos) y reducción de pérdidas postcosecha.
- **Energía y Sostenibilidad Ambiental (28 capacidades):** Vocación altamente científica (19 en Ciencia, 0 en Tecnología, 8 en Emprendimiento, 1 en Producción). Pilar de descarbonización centrado en fuentes

renovables no convencionales, almacenamiento distribuido, preservación hídrica, redes predictivas y aprovechamiento de residuos.

La proporción interna de las capacidades OMPI y la amplitud de los grupos industriales GICS determinan el rol funcional de cada clúster dentro de la matriz productiva regional, a continuación, la Tabla 9, muestra el inventario de capacidades y dominios OMPI como grupos industriales GICS:

Tabla 9: Inventario de capacidades de innovación, dimensiones OMPI y contenido de grupos industriales GICS®.Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

Clúster Territorial	Grupos GICS	Ciencia	Tecno-logía	Emprend.	Produc-ción	Total OMPI	% Ciencia + Tec. (Oferta Push)	% Emp. + Prod. (Demanda Pull)
C1: Agroindustria, Alimentos y Nutrición	2	12	11	7	1	31 (11,92 %)	74,19 % (23 cap.)	25,81 % (8 cap.)
C2: Economía Digital, Software y Serv. Tec.	9	6	6	21	1	34 (13,08 %)	35,29 % (12 cap.)	64,71 % (22 cap.)
C3: Energía y Sostenibilidad Ambiental	2	19	0	8	1	28 (10,77 %)	67,86 % (19 cap.)	32,14 % (9 cap.)
C4: Hábitat Sostenible y Estilo de Vida	6	12	12	21	1	46 (17,69 %)	52,17 % (24 cap.)	47,83 % (22 cap.)
C5: Manufactura Avanzada y Materiales	5	29	12	12	6	59 (22,69 %)	69,49 % (41 cap.)	30,51 % (18 cap.)
C6: Salud, Biotecnología y C. de la Vida	2	49	6	6	1	62 (23,85 %)	88,71 % (55 cap.)	11,29 % (7 cap.)
Total / Promedio Sistema Territorial	**26**	**127**	**47**	**75**	**11**	**260 (100,0 %)**	**66,92 % (174 cap.)**	**33,08 % (86 cap.)**

- **Habilitadores de Conocimiento Científico-Tecnológico (oferta *push*):** Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida (88,71 % de sus capacidades en Ciencia y Tecnología), Agroindustria, Alimentos y Nutrición (74,19 %), Manufactura Avanzada y Materiales (69,49 %) y Energía y Sostenibilidad Ambiental (67,86 %) concentran su acervo en la generación de conocimiento base e ingeniería aplicada.
- **Traccionadores de Mercado y Despliegue Empresarial (demanda *pull*):** Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos (64,71 % en Emprendimiento y Producción, articulando 9 grupos industriales GICS) y Hábitat Sostenible y Estilo de Vida (47,83 % en Emprendimiento y Producción, con 6 grupos industriales GICS) poseen la capilaridad comercial para absorber y escalar innovaciones en el mercado.
- **Transversalidad de las 150 Capacidades Únicas:** Sobre las $n = 150$ capacidades únicas (media de presencia $\mu = 1{,}72$ clústeres por capacidad, mediana $= 1{,}00$, mínimo $= 1$, máximo $= 4$ y desviación estándar $\sigma = 0{,}98$), el 58,67 % (88 capacidades) son exclusivas de un solo clúster; el 17,33 % (26 capacidades) son compartidas por 2 clústeres; el 17,33 % (26 capacidades) conectan a 3 clústeres; y el 6,67 % (10 capacidades) son altamente transversales al estar presentes en 4 clústeres simultáneamente.

2.7.1 Modelación Matemática: Ajuste RAS, Inversa de Leontief y Coeficientes de Rasmussen (30 Retos CAME)

Para priorizar los seis clústeres en función de los 30 Retos Territoriales del análisis CAME (7 en Sostenibilidad Ambiental, 7 en Transformación Digital y Gobierno Inteligente, 8 en Desarrollo Social-Humano y 8 en Desarrollo Económico), se adapta el modelo multisectorial de (Tapia et al., 2024). En este marco, la matriz de incidencia semántico-funcional $\mathbf{M}$ de dimensión 6×30 (180 cruces) evalúa cada cruce (i, k) en la escala lineal $m_{ik} \in \{0, 1, 2, 3\}$, donde 0 representa vínculo nulo, 1 vínculo indirecto o de entorno, 2 vínculo sectorial operativo GICS y 3 vínculo estructural habilitado directamente por una capacidad OMPI, seguida de las estadísticas descriptivas y la recalibración del modelo RAS – Leontief – Rasmussen.

1. Formulación de ecuaciones del modelo: estadísticos descriptivos de capacidades OMPI y estructura de los clústeres. La consolidación de los 30 retos elimina duplicidades operativas y revela con mayor nitidez la especialización de cada clúster tanto en el puntaje global como en cada una de las cuatro áreas estratégicas. Para lo anterior se consideran las siguientes formulaciones:

En cada área estratégica, el bloque inicial de retos agrupa las brechas estructurales y amenazas críticas (Corregir / Afrontar, ponderador $W_k = 1{,}25$), mientras que el segundo bloque agrupa las oportunidades y fortalezas consolidadas (Explotar / Mantener, ponderador $W_k = 1{,}15$). Estos valores de ponderación se definieron como un parámetro de diseño metodológico en la adaptación del modelo para traducir la naturaleza cualitativa del diagnóstico CAME a la matriz cuantitativa de Rasmussen.

Esta decisión se fundamenta en la advertencia teórica base de que los modelos puramente matemáticos son "representaciones parciales de la realidad". Si todos los retos CAME tuvieran un peso plano ($W_k = 1{,}0$), el modelo tendría sesgo sobre la urgencia y asumiría que mantener una dinámica que ya es exitosa tiene la misma importancia que resolver una crisis estructural. Al multiplicar la calificación de acoplamiento de cada clúster (escala de 0 a 3) por este factor W_k antes de inyectar los datos al método RAS, se obliga a la Matriz Inversa de Leontief a otorgar mayor Sensibilidad (SD_i) y Poder (PD_j) a aquellos clústeres cuyas capacidades OMPI y sectores GICS resuelven los problemas más graves y urgentes del territorio, en lugar de premiar a aquellos que solo participan en las dinámicas fáciles o ya consolidadas.

Es importante resaltar que, para que la Matriz Inversa de Leontief $(I - A^*)^{-1}$ sea matemáticamente convergente y tenga sentido ecosistémico, la matriz de coeficientes A^* debe mantener proporciones reales. Si se introducen multiplicadores del doble de tamaño (2 frente a 1), el algoritmo iterativo RAS sobreajustaría los vectores marginales de oferta y demanda, produciendo coeficientes de Rasmussen (PD_j y SD_i) artificiales.

2. Matriz base de acoplamiento inter-clúster y ponderación CAME. Cada reto territorial $k \in \{1, \ldots, 30\}$ recibe un ponderador normativo de urgencia estratégica, como se explica en el apartado anterior. Se asigna $W_k = 1{,}25$ a los retos de brechas estructurales y amenazas críticas o riesgos exógenos de tipo Corregir/Afrontar, mientras que el segundo bloque, con $W_k = 1{,}15$, agrupa los retos de potencialidades y fortalezas de tipo Explotar/Mantener.

El flujo base de co-incidencia $Z^{(0)}$ y la matriz de coeficientes técnicos iniciales $A^{(0)}$ entre el clúster proveedor i y el clúster demandante j se definen como:

$$Z_{ij}^{(0)} = \sum_{k=1}^{30} W_k \cdot m_{ik} \cdot m_{jk} \qquad ; \qquad A_{ij}^{(0)} = \frac{Z_{ij}^{(0)}}{X_j} \tag{10}$$

3. Estimación biproporcional mediante el método RAS. Siguiendo a Stone (1962), Schuschny (2005) y Flores-Tapia et al. (2024), la matriz de coeficientes técnicos $A^{(0)}$ se ajusta iterativamente por filas y columnas

hasta converger a la matriz estructural regional A^* (con error numérico $< 10^{-15}$):

$$A^* = \prod_t r^{(t)} \cdot A^{(0)} \cdot \prod_t s^{(t)} = \text{RAS} \tag{11}$$

donde $r^{(t)}$ y $s^{(t)}$ son las matrices diagonales de los multiplicadores correctores que garantizan el cumplimiento simultáneo de los bordes marginales de Oferta Habilitadora por fila (u_i, determinada por la densidad de impactos estructurales Nivel 3 en los 30 retos CAME y el acervo de capacidades en Ciencia y Tecnología, $N_{\text{Ciencia}} + N_{\text{Tecnologia}}$) y de Demanda Tractora por columna (v_j, determinada por el alcance operativo sectorial ponderado por la entropía de Shannon H_j en las 4 áreas CAME y la amplitud empresarial $N_{\text{Emprendimiento}} + N_{\text{Produccion}}$ y grupos GICS).

4. Matriz inversa de Leontief. A partir de la matriz ajustada A^*, el sistema abierto de Leontief relaciona la demanda final de soluciones territoriales (Y) con el nivel de activación total de los clústeres (X) a través de la Matriz Inversa de Leontief $\alpha = (I - A^*)^{-1}$:

$$X = (I - A^*)^{-1} \cdot Y = \alpha \cdot Y \qquad \text{donde} \qquad \alpha = [\alpha_{ij}] \tag{12}$$

Cada elemento α_{ij} cuantifica el impacto total (directo más indirecto) que un incremento unitario en la activación del clúster j induce sobre las capacidades del clúster i. La sumatoria por columna ($\sum_i \alpha_{ij}$) define el Multiplicador Total de Tracción (*Pull*), mientras que la sumatoria por fila ($\sum_j \alpha_{ij}$) define el Efecto Habilitador Total (*Push*).

5. Coeficientes de dispersión de Rasmussen (Poder de Dispersión y Sensibilidad de Dispersión). Con $n = 6$ clústeres y media global de la matriz inversa $\bar{\alpha} = \frac{1}{n^2} \sum_i \sum_j \alpha_{ij} = 0{,}3107$, los índices normalizados de Rasmussen se calculan mediante las ecuaciones:

$$PD_j = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \alpha_{ij}}{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \alpha_{ij}} \tag{13}$$

$$SD_i = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} \alpha_{ij}}{\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \alpha_{ij}} \tag{14}$$

Muestra los vectores objetivo de *push* (u) y *pull* (v), los multiplicadores hacia adelante/atrás y los coeficientes de dispersión normalizados:

- $PD_j > 1$: alta capacidad de tracción/arrastre sobre los demás sectores (*Pull*).
- $SD_i > 1$: alta capacidad habilitadora/impulsora hacia el ecosistema (*Push*).

2.7.2 Síntesis de resultados: matrices de incidencia a CAME, coeficientes técnicos RAS e inversa de Leontief (30 retos)

La Tabla 10 y la Tabla 11 resumen las estadísticas de acoplamiento de los seis clústeres sobre los 30 Retos Territoriales y su distribución ponderada en las cuatro áreas del diagnóstico CAME:

Para efectos demostrativos, tanto el clúster **C1: Agroindustria** como **C2: Economía Digital** registran exactamente 15,75 puntos en el área de Sostenibilidad Ambiental (SA, retos 1 al 7). El desglose reto por reto, incluyendo **C3: Energía y Sostenibilidad** como referencia comparativa, se presenta en la Tabla 12:

Tabla 10: Estadísticas descriptivas de incidencia en los 30 retos (segmento a). Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

Clúster	Suma bruta (/90)	Media (0–3)	Nivel 3 (OMPI)	Nivel 2 (GICS)	Nivel 1 (Ind)	Nivel 0 (Nulo)	Suma ponderada
C2: Econ. Digital	77	2.57	20	7	3	0	92.95
C5: Manuf. Avanzada	66	2.20	15	9	3	3	79.40
C4: Hábitat Sost.	60	2.00	8	15	6	1	72.20
C6: Salud y Biotec.	45	1.50	9	4	10	7	54.15
C3: Energía y Sost.	41	1.37	9	3	8	10	49.65
C1: Agroindustria	37	1.23	6	5	9	10	44.65

Tabla 11: Resumen de incidencia ponderada por área estratégica (segmento b). Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

Clúster	Sostenibilidad Ambiental (SA)	Transformación Digital (TD)	Desarrollo Social (DS)	Desarrollo Económico (DE)	Total ponderado	Entropía (transversalidad)
C1: Agroindustria	15.75	6.05	5.95	16.90	44.65	0.919
C2: Econ. Digital	15.75	25.35	26.50	25.35	92.95	0.990
C3: Energía y Sost.	25.35	10.95	3.75	9.60	49.65	0.839
C4: Hábitat Sost.	16.90	13.15	20.65	21.50	72.20	0.994
C5: Manuf. Avanzada	24.10	20.45	14.40	20.45	79.40	0.981
C6: Salud y Biotec.	2.40	15.75	21.50	14.50	54.15	0.885

Tabla 12: Desglose del puntaje ponderado en Sostenibilidad Ambiental (SA) para C1, C2 y C3. Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

Reto (k)	Naturaleza CAME	W_k	C1 bruto	C1 pond.	C2 bruto	C2 pond.	C3 bruto	C3 pond.
R01: Saturación y Modelo Lineal de Residuos	Corregir/Afrontar	1,25	3	3,75	1	1,25	3	3,75
R02: Obsolescencia Logística y Aire	Corregir/Afrontar	1,25	1	1,25	2	2,50	3	3,75
R03: Vulnerabilidad y Riesgo en Laderas	Afrontar	1,25	3	3,75	3	3,75	3	3,75
R04: Brecha de Eficiencia Energética Pyme	Corregir/Afrontar	1,25	1	1,25	2	2,50	3	3,75
R05: Electromovilidad y Finanzas Verdes	Explotar/Mantener	1,15	0	0,00	2	2,30	3	3,45
R06: Parques Tecnológicos de Residuos	Explotar/Mantener	1,15	3	3,45	1	1,15	3	3,45
R07: Economía Circular y Materiales	Explotar/Mantener	1,15	2	2,30	2	2,30	3	3,45
Total área SA	—	—	**13**	**15,75**	**13**	**15,75**	**21**	**25,35**

$$\text{SA Pond (C1)} = 3{,}75 + 1{,}25 + 3{,}75 + 1{,}25 + 0{,}00 + 3{,}45 + 2{,}30 = 15{,}75$$
$$\text{SA Pond (C2)} = 1{,}25 + 2{,}50 + 3{,}75 + 2{,}50 + 2{,}30 + 1{,}15 + 2{,}30 = 15{,}75$$

De manera complementaria, al evaluar cada clúster a lo largo de sus $n = 4$ áreas CAME, se explica el Índice de Entropía de Shannon (H_i) (ver Tabla 13), en donde los valores cercanos a 1 indican reparto equilibrado del puntaje entre las cuatro áreas (transversalidad); valores más bajos indican concentración en pocas áreas (especialización de nicho).

Tabla 13: Estadísticos por clúster (lectura horizontal) y entropía de Shannon asociada. Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

Clúster	μ	Mediana	Mín	Máx	σ	H_i	Lectura
C1: Agroindustria	11,16	10,90	5,95	16,90	5,98	0,919	Especialización moderada (concentrado en SA y DE)
C2: Economía Digital	23,24	25,35	15,75	26,50	5,02	0,990	Alta transversalidad
C3: Energía y Sostenibilidad	12,41	10,28	3,75	25,35	9,17	0,839	Especialización de nicho
C4: Hábitat Sostenible	18,05	18,77	13,15	21,50	3,83	0,994	Alta transversalidad
C5: Manufactura Avanzada	19,85	20,45	14,40	24,10	4,02	0,981	Alta transversalidad
C6: Salud y Biotecnología	13,54	15,12	2,40	21,50	8,03	0,885	Especialización de nicho

Nota: *Los valores de H_i se reportan tal como constan en la fuente; el documento original no explicita la fórmula exacta de normalización empleada para H_i, por lo que aquí se presentan como dato de entrada ya calculado, no como resultado derivable de las ecuaciones anteriores.*

2. Resultados del modelo RAS, multiplicadores y clasificación Rasmussen La Matriz inversa de Leontief ($\alpha = (I - A_{\text{RAS}})^{-1}$). Representa el requerimiento total (directo e indirecto) que un incremento unitario de demanda final en la columna j genera sobre la producción/capacidad del clúster en la fila i.

Media global de Leontief: $\mathbf{0{,}3107}$

A continuación, la Tabla 14 y la tabla de la matriz inversa presentan la Matriz de Coeficientes Técnicos Ajustada vía RAS (A^*) y la Matriz Inversa de Leontief $\alpha = (I - A^*)^{-1}$, junto con los coeficientes de Rasmussen resultantes para el universo de 30 retos:

Por ejemplo, el cruce entre C2: Economía Digital y C5: Manufactura Avanzada suma $Z^{(0)}_{2,5} = 201{,}35$, lo que refleja su altísima sinergia en retos como Infraestructura C5 e IA (R13), *Living Labs* (R14), Interoperabilidad V2X (R10) y *Nearshoring* (R27).

2.7.3 Construcción de los bordes marginales u_i (*push*) y v_j (*pull*)

En una matriz simétrica simple $Z^{(0)}$, filas y columnas sumarían lo mismo ($PD_j = SD_i$). Para capturar la asimetría real entre quién provee conocimiento habilitador (oferta *push*, por fila) y quién tracciona sectores

Tabla 14: Matriz de coeficientes técnicos ajustada vía RAS (A^*).Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

Matriz técnica RAS (A^*)	C1: Agroind.	C2: Econ. Dig.	C3: Energía	C4: Hábitat	C5: Manuf.	C6: Salud	Borde u_i (oferta *push*)
C1: Agroindustria	0,0433	0,0694	0,0324	0,0650	0,0568	0,0244	0,291
C2: Econ. Digital	0,0429	0,1748	0,0414	0,1360	0,1159	0,0548	0,566
C3: Energía y Sost.	0,0366	0,0771	0,0495	0,0727	0,0776	0,0237	0,337
C4: Hábitat Sost.	0,0310	0,1034	0,0298	0,1013	0,0725	0,0280	0,366
C5: Manuf. Avanzada	0,0509	0,1643	0,0617	0,1346	0,1441	0,0499	0,605
C6: Salud y Biotec.	0,0436	0,1544	0,0393	0,1084	0,1097	0,0796	0,535
Borde v_j (demanda *pull*)	**0,248**	**0,743**	**0,254**	**0,618**	**0,577**	**0,259**	**Suma = 2,700**

productivos (demanda *pull*, por columna), se calculan los vectores marginales normalizados a una intensidad intermedia total del sistema de $\sum u_i = \sum v_j = 2{,}700$ ($0{,}45 \times 6$ clústeres):

En una matriz simétrica simple $Z^{(0)}$, filas y columnas sumarían lo mismo ($PD_j = SD_i$). Para capturar la asimetría real entre quién provee conocimiento habilitador (oferta *push*, por fila) y quién tracciona sectores productivos (demanda *pull*, por columna), se calculan los vectores marginales normalizados a una intensidad intermedia total del sistema de $\sum u_i = \sum v_j = 2{,}700$ ($0{,}45 \times 6$ clústeres):

Borde de fila u_i — Capacidad habilitadora (*push*). Combina el puntaje ponderado de impactos estructurales de Nivel 3 OMPI en los 30 retos (peso 50 %), el stock de capacidades en Ciencia + Tecnología (peso 35 %) y el puntaje CAME total (peso 15 %):

$$u_{i,\text{raw}} = 0{,}50\left(\frac{S_{\text{Nivel3},i}}{40{,}525}\right) + 0{,}35\left(\frac{N_{\text{Cie+Tec},i}}{29{,}00}\right) + 0{,}15\left(\frac{S_{\text{CAME},i}}{65{,}50}\right) \longrightarrow u_i = u_{i,\text{raw}} \cdot \frac{2{,}700}{\sum u_{\text{raw}}} \tag{15}$$

Donde $S_i^{(3)}$ es el puntaje ponderado de impactos de Nivel 3 (OMPI) del clúster i y P_i su puntaje CAME total.

Borde de columna v_j — Tracción sectorial (*pull*). Combina el puntaje operativo sectorial (Niveles 2 y 3, ponderado por el equilibrio inter-áreas H_j, peso 55 %) y la amplitud del tejido empresarial y productivo (Emprendimiento + Producción y Grupos GICS, peso 45 %):

$$\begin{aligned} v_{j,\text{raw}} = {} & 0{,}55\left(\frac{S_{\text{Sec},j} \cdot H_j}{41{,}514}\right) + 0{,}45 \cdot 0{,}5\left(\frac{N_{\text{Emp+Prd},j}}{14{,}333}\right) \\ & + 0{,}45 \cdot 0{,}5\left(\frac{\text{GICS}_j}{4{,}333}\right), \\ v_j = {} & v_{j,\text{raw}} \cdot \frac{2{,}700}{\sum_j v_{j,\text{raw}}} \end{aligned} \tag{16}$$

Tabla 15: Matriz Inversa de Leontief $\alpha = (I - A^*)^{-1}$, multiplicadores y coeficientes de Rasmussen. Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

Inversa de Leontief $\alpha = (I - A^*)^{-1}$	**C1: Agro-ind.**	**C2: Econ. Dig.**	**C3: Energía**	**C4: Hábitat**	**C5: Manuf.**	**C6: Salud**	**Suma filas (efecto *push*)**	**Sensibilidad dispersión (SD_i)**
C1: Agroindustria, Alimentos y Nutrición	1,0660	0,1419	0,0551	0,1252	0,1129	0,0473	1,548	0,830
C2: Economía Digital, Software y Serv.	0,0893	1,3187	0,0917	0,2600	0,2291	0,1032	2,092	1,122
C3: Energía y Sostenibilidad Ambiental	0,0618	0,1635	1,0773	0,1425	0,1444	0,0502	1,640	0,879
C4: Hábitat Sostenible y Estilo de Vida	0,0598	0,1973	0,0606	1,1778	0,1459	0,0597	1,701	0,912
C5: Manufactura Avanzada y Materiales	0,0988	0,3188	0,1127	0,2674	1,2663	0,1017	2,166	1,162
C6: Salud, Biotecnología y C. de la Vida	0,0868	0,3010	0,0821	0,2294	0,2131	1,1269	2,039	1,094
Suma columnas (multiplicador *pull*)	**1,463**	**2,441**	**1,480**	**2,202**	**2,112**	**1,489**	**Media** $\bar{\alpha} = 0{,}3107$	
Poder de dispersión (PD_j)	**0,784**	**1,309**	**0,794**	**1,181**	**1,133**	**0,799**	**Umbral** $= 1{,}000$	

Donde $S_j^{(2,3)}$ es el puntaje operativo sectorial (Niveles 2 y 3) y G_j el número de grupos GICS del clúster j.

Una vez obtenida la matriz técnica ajustada A^*, se calcula la matriz inversa de Leontief:

$$\alpha = (I - A^*)^{-1} = \begin{bmatrix} 1{,}0660 & 0{,}1419 & 0{,}0551 & 0{,}1252 & 0{,}1129 & 0{,}0473 \\ 0{,}0893 & 1{,}3187 & 0{,}0917 & 0{,}2600 & 0{,}2291 & 0{,}1032 \\ 0{,}0618 & 0{,}1635 & 1{,}0773 & 0{,}1425 & 0{,}1444 & 0{,}0502 \\ 0{,}0598 & 0{,}1973 & 0{,}0606 & 1{,}1778 & 0{,}1459 & 0{,}0597 \\ 0{,}0988 & 0{,}3188 & 0{,}1127 & 0{,}2674 & 1{,}2663 & 0{,}1017 \\ 0{,}0868 & 0{,}3010 & 0{,}0821 & 0{,}2294 & 0{,}2131 & 1{,}1269 \end{bmatrix} \tag{17}$$

2.7.4 Cálculo del denominador común de Rasmussen ($\bar{\alpha}$)

Tanto PD_j como SD_i comparten exactamente el mismo denominador: el promedio global de los n² = 36 elementos de la matriz inversa α:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{6}\sum_{j=1}^{6} \alpha_{ij} &= 1{,}4625 + 2{,}4412 + 1{,}4795 + 2{,}2023 + 2{,}1116 + 1{,}4890 \\ &= 11{,}1861, \\ \bar{\alpha} &= \frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{6}\sum_{j=1}^{6} \\ \alpha_{ij} &= \frac{11{,}1861}{36} = 0{,}310725 \approx 0{,}3107 \end{aligned} \tag{18}$$

Nota: *dividir el promedio de una columna ($\sum_i \alpha_{ij}/6$) entre $\bar{\alpha} = 0{,}310725$ es matemáticamente equivalente a dividir la suma de la columna entre la media de las sumas, $11{,}1861/6 = 1{,}86435$. Esta equivalencia se usa para simplificar el cálculo de Poder de Dispersión PD_j de cada clúster.*

2.7.5 Poder de Dispersión — PD_j (Pull, lectura por columnas)

$$PD_j = \frac{\frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6} \alpha_{ij}}{0{,}310725} = \frac{\text{Suma de columna } j}{1{,}86435} \tag{19}$$

C1: Agroindustria ($j = 1$).

$$\sum_{i=1}^{6} \alpha_{i1} = 1{,}0660 + 0{,}0893 + 0{,}0618 + 0{,}0598 + 0{,}0988 + 0{,}0868 = \mathbf{1{,}4625} \tag{20}$$

$$\text{Media columna } 1 = \frac{1{,}4625}{6} = 0{,}24375 \tag{21}$$

$$PD_1 = \frac{0{,}24375}{0{,}310725} = \mathbf{0{,}784} \tag{22}$$

C2: Economía Digital ($j = 2$).

$$\sum_{i=1}^{6} \alpha_{i2} = 0{,}1419 + 1{,}3187 + 0{,}1635 + 0{,}1973 + 0{,}3188 + 0{,}3010 = \mathbf{2{,}4412} \tag{23}$$

$$\text{Media columna } 2 = \frac{2{,}4412}{6} = 0{,}40687 \tag{24}$$

$$PD_2 = \frac{0{,}40687}{0{,}310725} = \mathbf{1{,}309} \tag{25}$$

C3: Energía y Sostenibilidad ($j = 3$).

$$\sum_{i=1}^{6} \alpha_{i3} = 0{,}0551 + 0{,}0917 + 1{,}0773 + 0{,}0606 + 0{,}1127 + 0{,}0821 = \mathbf{1{,}4795} \tag{26}$$

$$\text{Media columna } 3 = \frac{1{,}4795}{6} = 0{,}24658 \tag{27}$$

$$PD_3 = \frac{0{,}24658}{0{,}310725} = \mathbf{0{,}794} \tag{28}$$

C4: Hábitat Sostenible ($j = 4$).

$$\sum_{i=1}^{6} \alpha_{i4} = 0{,}1252 + 0{,}2600 + 0{,}1425 + 1{,}1778 + 0{,}2674 + 0{,}2294 = \mathbf{2{,}2023} \tag{29}$$

$$\text{Media columna } 4 = \frac{2{,}2023}{6} = 0{,}36705 \tag{30}$$

$$PD_4 = \frac{0{,}36705}{0{,}310725} = \mathbf{1{,}181} \tag{31}$$

C5: Manufactura Avanzada ($j = 5$).

$$\sum_{i=1}^{6} \alpha_{i5} = 0{,}1129 + 0{,}2291 + 0{,}1444 + 0{,}1459 + 1{,}2663 + 0{,}2131 = \mathbf{2{,}1116} \tag{32}$$

$$\text{Media columna } 5 = \frac{2{,}1116}{6} = 0{,}35193 \tag{33}$$

$$PD_5 = \frac{0{,}35193}{0{,}310725} = \mathbf{1{,}133} \tag{34}$$

C6: Salud y Biotecnología ($j = 6$).

$$\sum_{i=1}^{6} \alpha_{i6} = 0{,}0473 + 0{,}1032 + 0{,}0502 + 0{,}0597 + 0{,}1017 + 1{,}1269 = \mathbf{1{,}4890} \tag{35}$$

$$\text{Media columna } 6 = \frac{1{,}4890}{6} = 0{,}24817 \tag{36}$$

$$PD_6 = \frac{0{,}24817}{0{,}310725} = \mathbf{0{,}799} \tag{37}$$

2.7.6 Sensibilidad de Dispersión — SD_i (*push*, lectura por filas)

$$SD_i = \frac{\frac{1}{6}\sum_{j=1}^{6} \alpha_{ij}}{0{,}310725} = \frac{\text{Suma de fila } i}{1{,}86435} \tag{38}$$

C1: Agroindustria ($i = 1$).

$$\sum_{j=1}^{6} \alpha_{1j} = 1{,}0660 + 0{,}1419 + 0{,}0551 + 0{,}1252 + 0{,}1129 + 0{,}0473 = \mathbf{1{,}5483} \tag{39}$$

$$\text{Media fila } 1 = \frac{1{,}5483}{6} = 0{,}25805 \tag{40}$$

$$SD_1 = \frac{0{,}25805}{0{,}310725} = \mathbf{0{,}830} \tag{41}$$

C2: Economía Digital ($i = 2$).

$$\sum_{j=1}^{6} \alpha_{2j} = 0{,}0893 + 1{,}3187 + 0{,}0917 + 0{,}2600 + 0{,}2291 + 0{,}1032 = \mathbf{2{,}0920} \tag{42}$$

$$\text{Media fila } 2 = \frac{2{,}0920}{6} = 0{,}34867 \tag{43}$$

$$SD_2 = \frac{0{,}34867}{0{,}310725} = \mathbf{1{,}122} \tag{44}$$

C3: Energía y Sostenibilidad ($i = 3$).

$$\sum_{j=1}^{6} \alpha_{3j} = 0{,}0618 + 0{,}1635 + 1{,}0773 + 0{,}1425 + 0{,}1444 + 0{,}0502 = \mathbf{1{,}6397} \tag{45}$$

$$\text{Media fila } 3 = \frac{1{,}6397}{6} = 0{,}27328 \tag{46}$$

$$SD_3 = \frac{0{,}27328}{0{,}310725} = \mathbf{0{,}879} \tag{47}$$

C4: Hábitat Sostenible ($i = 4$).

$$\sum_{j=1}^{6} \alpha_{4j} = 0{,}0598 + 0{,}1973 + 0{,}0606 + 1{,}1778 + 0{,}1459 + 0{,}0597 = \mathbf{1{,}7011} \tag{48}$$

$$\text{Media fila } 4 = \frac{1{,}7011}{6} = 0{,}28352 \tag{49}$$

$$SD_4 = \frac{0{,}28352}{0{,}310725} = \mathbf{0{,}912} \tag{50}$$

C5: Manufactura Avanzada ($i = 5$).

$$\sum_{j=1}^{6} \alpha_{5j} = 0{,}0988 + 0{,}3188 + 0{,}1127 + 0{,}2674 + 1{,}2663 + 0{,}1017 = \mathbf{2{,}1657} \tag{51}$$

$$\text{Media fila } 5 = \frac{2{,}1657}{6} = 0{,}36095 \tag{52}$$

$$SD_5 = \frac{0{,}36095}{0{,}310725} = \mathbf{1{,}162} \tag{53}$$

C6: Salud y Biotecnología ($i = 6$).

$$\sum_{j=1}^{6} \alpha_{6j} = 0{,}0868 + 0{,}3010 + 0{,}0821 + 0{,}2294 + 0{,}2131 + 1{,}1269 = \mathbf{2{,}0393} \tag{54}$$

$$\text{Media fila } 6 = \frac{2{,}0393}{6} = 0{,}33988 \tag{55}$$

$$SD_6 = \frac{0{,}33988}{0{,}310725} = \mathbf{1{,}094} \tag{56}$$

2.8 Ruta de Priorización Territorial y Articulación Ecosistémica

El ajuste a los 30 Retos Territoriales produce una distinción funcional relevante dentro del Cuadrante I (Clústeres Clave): mientras Economía Digital (C2) lidera el Poder de Dispersión ($PD_j = 1{,}309$) como gran articulador del ecosistema, Manufactura Avanzada y Materiales (C5) pasa a ocupar el primer lugar en Sensibilidad de Dispersión ($SD_i = 1{,}162$) como el principal proveedor de capacidades científico-tecnológicas habilitadoras del territorio.

Se desglosa el puntaje de acoplamiento en las cuatro áreas estratégicas del territorio y se calcula la Entropía Normalizada ($0 \leq H \leq 1$), donde valores cercanos a $1{,}0$ indican un clúster balanceado y transversal a toda la agenda.

La Tabla 16 muestra que, de acuerdo con los umbrales de clasificación del Método de Rasmussen ($PD_j \gtrless 1$ y $SD_i \gtrless 1$), los seis clústeres territoriales se ordenan en cuatro categorías de política pública que definen la ruta de inversión, fortalecimiento y reconversión productiva para el Distrito de Ciencia, Tecnología e Innovación de Medellín:

Tabla 16: Ranking de evaluación-priorización de clústeres regionales según Poder de Dispersión y Sensibilidad de Dispersión. Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

Ranking	Clúster territorial	PD_j (*pull*) Poder de dispersión	SD_i (*push*) Sensibilidad de dispersión	Índice medio	Categoría de Rasmussen	Rol ecosistémico frente a los 30 retos regionales
1°	C2: Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos	1,309 (1°)	1,122 (2°)	1,216	**CLAVE** (Prioridad 1) $[PD > 1, SD > 1]$	**Articulador digital integral:** único clúster presente en los 30 retos (sin vacíos de Nivel 0) y líder en vínculos estructurales OMPI (20, Nivel 3). Habilita soberanía digital y GovTech (R8), ciberseguridad CECIB (R9), interoperabilidad y V2X (R10), talento STEAM/IA (R11, R17, R20) y gobernanza C5/*Big Data* (R13).
2°	C5: Manufactura Avanzada y Materiales	1,133 (3°)	1,162 (1°)	1,147	**CLAVE** (Prioridad 1) $[PD > 1, SD > 1]$	**Líder en capacidad habilitadora física:** combina 41 capacidades en Ciencia y Tecnología con 6 en Producción, logrando el mayor SD_i del sistema (1,162). Resuelve la renovación logística PM2.5 (R2), electromovilidad (R5), separación de polímeros (R1, R6), materiales adaptativos (R7), *Living Lab* de robótica/drones (R14) y *nearshoring* (R27).
3°	C4: Hábitat Sostenible y Estilo de Vida	1,181 (2°)	0,912 (4°)	1,047	**IMPULSADOR / MOTOR** (Prioridad 2B) $[PD > 1, SD < 1]$	**Tractor sectorial y urbano:** segundo mayor arrastrador de demanda ($PD = 1{,}181$), máxima entropía entre las 4 áreas (0,994) y líder en vínculos sectoriales GICS (15 retos en Nivel 2). Moviliza climatización eficiente pyme (R4), economía circular REP (R7), Sistema del Cuidado (R18, R21), mitigación de gentrificación (R24), turismo patrimonial (R29) y moda (R30).

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla 16

Ranking	Clúster territorial	PD_j (*pull*)	SD_i (*push*)	Índice medio	Categoría de Rasmussen	Rol ecosistémico frente a los 30 retos regionales
4°	C6: Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida	0,799 (4°)	1,094 (3°)	0,946	**ESTRATÉGICO / DE BASE** (Prioridad 2A) $[PD < 1, SD > 1]$	**Reserva científica y *Deep Tech*:** con 49 capacidades en Ciencia (62 totales), supera el umbral habilitador ($SD = 1{,}094$). Sostiene la retención de talento doctoral e I+D (R15), salud mental digital en Escuchaderos (R16), validación clínica y biotech en hospitales (R19), monitoreo nutricional ASIS (R22) y escalamiento de bioproductos (R23, R26, R28).
5°	C3: Energía y Sostenibilidad Ambiental	0,794 (5°)	0,879 (5°)	0,837	**ISLA / INSULAR** (Prioridad 3) $[PD < 1, SD < 1]$	**Especialista ambiental crítico (sujeto a articulación):** obtiene puntuación perfecta en los 7 retos de Sostenibilidad Ambiental (Nivel 3 en R1 a R7) y en protección de infraestructura crítica (R9), pero carece de capacidades tecnológicas homologadas ($N_{\text{Tecnología}} = 0$). Debe integrarse con C5 y C2.
6°	C1: Agroindustria, Alimentos y Nutrición	0,784 (6°)	0,830 (6°)	0,807	**ISLA / INSULAR** (Prioridad 3) $[PD < 1, SD < 1]$	**Nicho de reconversión bioeconómica:** impacta de forma estructural 6 retos: valorización del 55 % de residuos orgánicos (R1, R6), riesgo en laderas (R3), nutrición ASIS (R22), biofábricas rurales (R26) y cadenas de bioeconomía (R28). Su ruta es el encadenamiento directo con Salud y Biotecnología (C6).

2.8.1 Jerarquización Estructural y Rol Ecosistémico de los Clústeres

Al evaluar la capacidad de cada clúster para habilitar soluciones frente a los 30 retos regionales (encadenamiento hacia adelante) y su potencia para arrastrar y demandar insumos del resto del tejido productivo (encadenamiento hacia atrás), el ecosistema se ordena en cuatro categorías estratégicas de intervención:

A. Núcleo de Prioridad 1 — Clústeres Clave: el motor dual de tracción y habilitación tecnológica.
Los clústeres de Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos y Manufactura Avanzada y Materiales se consolidan como los dos Clústeres Clave de la estructura económica regional, absorbiendo conjuntamente el 43,9 % del flujo total de incidencia sobre los retos del territorio.

- **Nivel 1 — Clústeres Clave ($PD_j > 1$ y $SD_i > 1$): foco central de inversión pública y privada.**
  1. Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos ($PD_j = 1{,}309$; $SD_i = 1{,}122$; multiplicador *pull* $= 2{,}441$): registra el mayor multiplicador del sistema territorial: por cada unidad de activación en sus retos, induce 2,441 unidades de impacto en el ecosistema. Es el único clúster con incidencia activa sobre la totalidad de los 30 retos territoriales (con 92,95 puntos ponderados, equivalentes al 23,65 % del flujo total) y aporta la solución tecnológica estructural en 20 de ellos. Su rol va mucho más allá del sector informático tradicional; opera como la infraestructura habilitadora para la soberanía digital mediante la Compra Pública de Innovación (GovTech) con el Conglomerado Público como cliente ancla (Reto 8), la Central Estratégica contra Ciberdelitos CECIB (Reto 9), la arquitectura común de interoperabilidad movilidad-salud-hacienda y analítica V2X (Reto 10), la extensión digital para MiPymes y conectividad escolar (Reto 11) y el cierre de brechas de talento especializado STEAM y bilingüismo (Retos 17 y 20).
- **2. Manufactura Avanzada y Materiales** ($PD_j = 1{,}133$; $SD_i = 1{,}162$; efecto habilitador *push* $= 2{,}166$): ocupa el primer lugar en Sensibilidad de Dispersión ($SD_i = 1{,}162$) gracias a su combinación de 41 capacidades en Ciencia y Tecnología con el liderazgo absoluto en Producción industrial (6 capacidades). Mientras Economía Digital resuelve la capa inmaterial y de datos, Manufactura Avanzada provee el soporte de ingeniería, materiales compuestos, sistemas ciberfísicos y logística multimodal indispensable para descarbonizar el territorio. Es el brazo ejecutor indispensable para materializar las soluciones físicas del territorio: renovación tecnológica del transporte de carga y volquetas emisoras de PM2.5 (Reto 2), expansión de la electromovilidad masiva (Reto 5), plantas de separación y valorización de plásticos complejos en el Parque Tecnológico Ambiental (Retos 1 y 6), desarrollo de materiales compuestos adaptativos

(Reto 7), validación de robótica y drones en el *Living Lab* (Reto 14) y atracción de inversión extranjera directa por *nearshoring* con desarrollo de proveedores locales (Retos 25 y 27).

Nivel 2B — Clúster Impulsador / Motor ($PD_j > 1$ y $SD_i < 1$): tractor de demanda urbana y empleo.

- **3. Hábitat Sostenible y Estilo de Vida** ($PD_j = 1{,}181$; $SD_i = 0{,}912$; multiplicador *pull* $= 2{,}202$): se consolida como el segundo mayor arrastrador de demanda del territorio ($PD_j = 1{,}181$) y exhibe el índice de equilibrio más alto entre las cuatro áreas del desarrollo regional (entropía $= 0{,}994$); impulsado por 21 capacidades de Emprendimiento, 6 grupos industriales GICS y 15 vínculos operativos de Nivel 2. Su activación tracciona cadenas de valor en la reconversión energética y climatización de pymes (Reto 4), nuevos mercados de economía circular bajo normativa REP (Reto 7), infraestructura para el Sistema Distrital de Cuidado y tecnologías asistivas (Retos 18 y 21), renovación y densificación urbana sostenible frente a la gentrificación por nómadas digitales (Reto 24), turismo inteligente patrimonial (Reto 29) y sofisticación exportadora del clúster textil/moda (Reto 30).

Nivel 2A — Clúster Estratégico de Base ($PD_j < 1$ y $SD_i > 1$): reserva científica y *Deep Tech*.

- **4. Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida** ($PD_j = 0{,}799$; $SD_i = 1{,}094$; efecto habilitador *push* $= 2{,}039$):
  Si bien su encadenamiento comprador hacia sectores manufactureros tradicionales es acotado debido a la alta especificidad regulatoria, al concentrar 49 capacidades en Ciencia (62 en total, el máximo acervo del Distrito), su aporte hacia adelante es insustituible para evitar el estancamiento competitivo regional; sin embargo, opera sobre un tejido empresarial altamente especializado de solo 2 grupos industriales GICS, su encadenamiento comprador hacia atrás es moderado ($PD_j = 0{,}799$), mientras que su Sensibilidad de Dispersión hacia adelante supera ampliamente el umbral promedio ($SD_i = 1{,}094$). Funciona como la plataforma científica irreemplazable para elevar la inversión regional en I+D por encima del 1 % del PIB y retener talento doctoral (Reto 15), desplegar plataformas de telepsicología e IA en los Escuchaderos frente a la crisis de salud mental (Reto 16), convertir los hospitales de alta complejidad en laboratorios de validación de dispositivos médicos y ensayos clínicos (Reto 19), sostener la vigilancia epidemiológica nutricional ASIS para "Medellín Cero Hambre" (Reto 22) y liderar los fondos de capital de riesgo en *Deep Tech* y biotecnología (Reto 23).

Nivel 3 — Clústeres Isla / Insulares ($PD_j < 1$ y $SD_i < 1$): reconversión productiva y encadenamiento dirigido.

El modelo identifica a Energía y Sostenibilidad Ambiental y a Agroindustria, Alimentos y Nutrición dentro del cuadrante de comportamiento insular, un hallazgo de alta relevancia para el diseño de política pública:

- **5. Energía y Sostenibilidad Ambiental** ($PD_j = 0{,}794$; $SD_i = 0{,}879$): aunque alcanza puntuación perfecta en los 7 retos de Sostenibilidad Ambiental (25,35 puntos ponderados; media $= 3{,}00$) y lidera la protección de infraestructura crítica (Reto 9), el modelo revela por qué se ubica en el Cuadrante III: concentra más de la mitad de su incidencia en una sola dimensión CAME y presenta un vacío estructural de 0 capacidades homologadas en el eslabón de Tecnología ($N_{\text{Tecnología}} = 0$). Se evidencia una concentración exclusivamente científica y de servicios públicos básicos, con ausencia de dominios propios en desarrollo tecnológico intermedio.
  Para superar este aislamiento y convertir su potencial científico en tracción económica, la política distrita La directriz de política pública no es destimula la inversión, articulando sus 19 capacidades científicas con las capacidades tecnológicas y encadenarlo directamente con Manufactura Avanzada (desarrollo de bienes de capital energéticos y materiales) y Economía Digital (redes inteligentes y medición predictiva) para ejecutar la reconversión de La Pradera/La Piñuela en el Parque Tecnológico Ambiental (generación de biogás para 200.000 hogares en los Retos 1 y 6) y la infraestructura de carga para electromovilidad (Reto 5).
- **6. Agroindustria, Alimentos y Nutrición** ($PD_j = 0{,}784$; $SD_i = 0{,}830$): su ubicación insular refleja la desarticulación histórica entre la producción primaria rural y la economía urbana de servicios avanzados. No obstante, es un actor crítico en seis retos estructurales del territorio con 23 capacidades en Ciencia y Tecnología que resultan determinantes en 6 retos de nivel estructural (Nivel 3): compostaje industrial del 55 % de residuos orgánicos municipales (Retos 1 y 6), teledetección de biomasa y contención de riesgo en laderas (Reto 3), seguridad alimentaria ASIS (Reto 22), tecnificación mediante biofábricas en los corregimientos (Reto 26) y desarrollo de bioproductos derivados de la biodiversidad (Reto 28). Su ruta de reconversión hacia el Cuadrante Estratégico consiste en su acoplamiento directo con Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida (C6), conectando la biomasa rural con cadenas globales de ingredientes funcionales,

fitofármacos y cosmética verde.

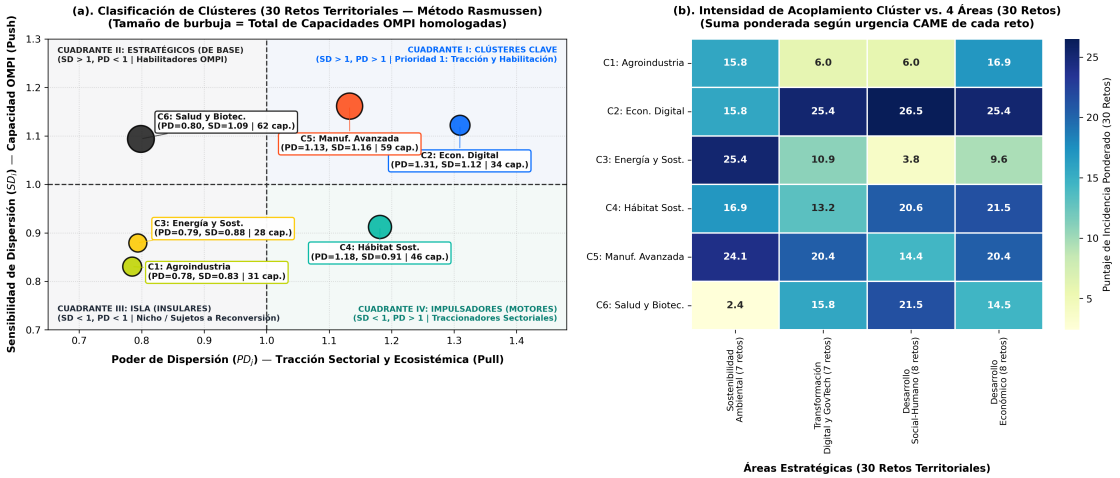


Figura 9: Panel (a): clasificación de los 6 clústeres territoriales según Poder de Dispersión (PD_j) y Sensibilidad de Dispersión (SD_i) sobre los 30 retos CAME. Panel (b): mapa de calor del puntaje ponderado de incidencia en las 4 áreas estratégicas. Fuente: Elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

La Figura 9 combina dos lentes analíticos complementarios: el posicionamiento estructural del clúster dentro del ecosistema (Panel (a), izquierda) y su intensidad temática frente a las cuatro dimensiones del desarrollo (Panel (b), derecha).

2.8.2 Lectura del Panel A (plano cartesiano de dispersión de Rasmussen)

Las líneas punteadas en $1{,}0$ (el promedio del sistema): el valor $1{,}0$ en ambos ejes representa el desempeño medio de la economía regional. Un valor superior a $1{,}0$ indica que el clúster supera el promedio territorial; un valor inferior a $1{,}0$ indica una incidencia focalizada o de nicho.

Eje horizontal — Poder de Dispersión (PD_j, efecto *pull* o tracción sectorial): mide la capacidad de arrastre hacia atrás del clúster. Cuanto más a la derecha se ubica una burbuja (p. ej., Economía Digital con $PD = 1{,}31$ o Hábitat Sostenible con $PD = 1{,}18$), mayor es el efecto multiplicador que genera sobre los demás clústeres cuando se invierte en sus sectores GICS y en su tejido emprendedor.

Eje vertical — Sensibilidad de Dispersión (SD_i, efecto *push* o capacidad habilitadora OMPI): mide el encadenamiento hacia adelante. Cuanto más arriba se ubica una burbuja (p. ej., Manufactura Avanzada con $SD = 1{,}16$, Economía Digital con $SD = 1{,}12$ o Salud y Biotecnología con $SD = 1{,}09$), más indispensables resultan sus capacidades científicas y tecnológicas OMPI como insumo transversal para que el resto del territorio pueda resolver sus retos.

El diámetro de las burbujas (masa crítica de innovación): el tamaño de cada círculo es directamente proporcional al volumen de capacidades OMPI homologadas en el clúster (desde 28 capacidades en Energía y Sostenibilidad hasta 62 capacidades en Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida). Esto permite observar de un vistazo que tener un gran volumen científico (como C6: Salud y Biotec. con 62 capacidades) posiciona al clúster en la parte superior del gráfico ($SD > 1$), pero no garantiza por sí solo tracción comercial hacia la derecha ($PD > 1$) si su base de sectores industriales es acotada.

Significado de los 4 cuadrantes de política pública.

- **Cuadrante I — Clústeres Clave (verde, arriba a la derecha):** reúne a C2: Economía Digital y C5: Manufactura Avanzada. Superan el umbral $1{,}0$ en ambos ejes: proveen las tecnologías habilitadoras críticas y, al mismo tiempo, movilizan a toda la economía regional. Constituyen la Prioridad 1 de asignación presupuestaria.
- **Cuadrante II — Clústeres Estratégicos o de Base (azul, arriba a la izquierda):** ubica a C6: Salud, Biotecnología y

Ciencias de la Vida ($SD = 1{,}09$, $PD = 0{,}80$). Es el gran proveedor de ciencia avanzada y *Deep Tech* del territorio; aunque demanda menos insumos de otros sectores tradicionales, actúa como pilar de conocimiento sin el cual los retos de alta complejidad quedarían desatendidos.

- **Cuadrante IV — Clústeres Impulsadores o Motores (naranja, abajo a la derecha):** ubica a C4: Hábitat Sostenible y Estilo de Vida ($PD = 1{,}18$, $SD = 0{,}91$). Es un potente motor de demanda: al activar proyectos urbanos, inmobiliarios, de infraestructura del cuidado o del sector moda, compra e integra tecnologías y materiales de todos los demás clústeres.
- **Cuadrante III — Clústeres Isla o Insulares (rojo, abajo a la izquierda):** ubica a C3: Energía y Sostenibilidad ($PD = 0{,}79$, $SD = 0{,}88$) y C1: Agroindustria ($PD = 0{,}78$, $SD = 0{,}83$). No significa que sean irrelevantes, sino que su impacto actual está concentrado en nichos específicos y desconectado del resto de la matriz productiva, por lo que requieren políticas de articulación y reconversión tecnológica.

2.8.3 Lectura del Panel B (mapa de calor de intensidad clúster vs. 4 áreas CAME)

Muestra el puntaje ponderado que cada clúster aporta para resolver los retos de cada área estratégica (tonos azul oscuro indican máxima incidencia; tonos amarillos indican baja incidencia).

Permite explicar visualmente por qué un clúster cae en determinado cuadrante del Panel A: por ejemplo, se observa que C3: Energía y Sostenibilidad alcanza el puntaje máximo en Sostenibilidad Ambiental (25,4 puntos), pero cae drásticamente en Desarrollo Social-Humano (3,8) y Desarrollo Económico (9,6), lo que explica su baja transversalidad global. En contraste, C2: Economía Digital, C5: Manufactura Avanzada y C4: Hábitat Sostenible mantienen franjas térmicas intensas a lo largo de las cuatro columnas.

El diagnóstico de la oferta de innovación revela una especialización funcional marcada entre los seis clústeres del territorio. Cerca de la mitad del acervo total de capacidades regionales se concentra en el ámbito de la Ciencia (127 capacidades; 48,8 %), seguido por el Emprendimiento (75 capacidades; 28,8 %), el desarrollo Tecnológico (47 capacidades; 18,1 %) y los eslabones de Producción (11 capacidades; 4,2 %).

Esta distribución configura dos perfiles claramente diferenciados dentro del ecosistema. Por un lado, emergen clústeres generadores de conocimiento científico-técnico, encabezados por Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida (que concentra 49 capacidades científicas de un total de 62) y Manufactura Avanzada y Materiales (con 29 capacidades científicas, 12 tecnológicas y el liderazgo absoluto en capacidades de producción industrial con 6 dominios). Por otro lado, destacan clústeres de tracción comercial y despliegue empresarial, liderados por Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos y Hábitat Sostenible y Estilo de Vida, cada uno con 21 capacidades de emprendimiento y una amplia cobertura de sectores industriales GICS que les permite conectar rápidamente las soluciones técnicas con la demanda ciudadana, inmobiliaria, financiera y de servicios.

2.9 Complejidad de capacidades en clúster

En el contexto de la economía global del conocimiento, el crecimiento económico ya no está garantizado por la acumulación convencional de factores productivos ni por la expansión en volumen de bienes primarios. Como lo evidencia el informe de referencia «*Perspectivas sobre las capacidades de innovación 2026*» (OMPI, 2026), la competitividad de largo plazo de las regiones depende fundamentalmente de la capacidad de sus ecosistemas para dominar, interconectar y sofisticar sus capacidades de innovación.

Dicho marco conceptual establece que la innovación no es un fenómeno homogéneo ni unidimensional. Por el contrario, se estructura a partir de cuatro dimensiones interdependientes que deben operar sincrónicamente: Ciencia (generación de conocimiento fundamental), Tecnología (I+D aplicada y patentes), Producción (manufactura avanzada y comercio exterior) y Emprendimiento (comercialización, dinamismo empresarial y marcas). Sin embargo, la evidencia global demuestra que la verdadera ventaja competitiva no reside únicamente en la cantidad de capacidades presentes en un territorio, sino en su complejidad intrínseca y en la efectividad de sus conexiones interdimensionales. Mientras que la producción científica o las marcas comerciales son cada vez más accesibles y modulares, las capacidades tecnológicas complejas continúan estando hiperconcentradas en un selecto grupo de economías líderes.

Bajo esta premisa, el presente capítulo evalúa y diagnostica el portafolio de capacidades homologadas en los seis clústeres

estratégicos del ecosistema: Agroindustria, Alimentos y Nutrición; Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos; Energía y Sostenibilidad Ambiental; Hábitat Sostenible y Estilo de Vida; Manufactura Avanzada y Materiales; y Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida.

Para superar las lecturas unidimensionales basadas exclusivamente en el tamaño o la facturación de los sectores, se formula e implementa la «Matriz de Complejidad de Capacidades en Clúster». Esta herramienta analítica de cuatro cuadrantes evalúa la posición de cada iniciativa clusteril articulando dos ejes cuantitativos esenciales:

1. **El eje de densidad (eje Y):** mide la masa crítica y la diversidad de capacidades acumuladas en el clúster, determinando la amplitud de su base de conocimiento.
2. **El eje de sofisticación (eje X):** evalúa la calidad, la profundidad técnica y la complejidad agregada de dichas capacidades mediante un índice ponderado normalizado, diferenciando entre conocimientos de frontera tecnológica e investigaciones o procesos tradicionales.

A través de esta metodología, los clústeres son clasificados en cuatro cuadrantes estratégicos: *Prominentes* (liderazgo consolidado y masa crítica compleja), *Tradicional* (volumen elevado pero con desacople traslacional), *Vulnerable* (capacidades incipientes y dispersas) y *Especialización* (nichos de alto valor y frontera tecnológica).

El documento proporciona una justificación rigurosa del posicionamiento de cada sector, al desentrañar los cuellos de botella traslacionales, como la brecha recurrente entre investigación académica y patentes aplicadas, para servir de hoja de ruta basada en datos para la formulación de políticas de desarrollo productivo, ciencia, tecnología e innovación (CTI) adaptadas a la madurez de cada clúster.

2.9.1 Matriz de complejidad de capacidades en clúster

La construcción de la «Matriz de Complejidad de Capacidades en Clúster» se evidencia al integrar las métricas de los datos de densidad y sofisticación, los cuales se apoyan en el marco de complejidad económica del informe *Perspectivas sobre las capacidades de innovación* (OMPI, 2026), desarrollado junto al *Growth Lab* de la Universidad de Harvard. Ver Figura 10.

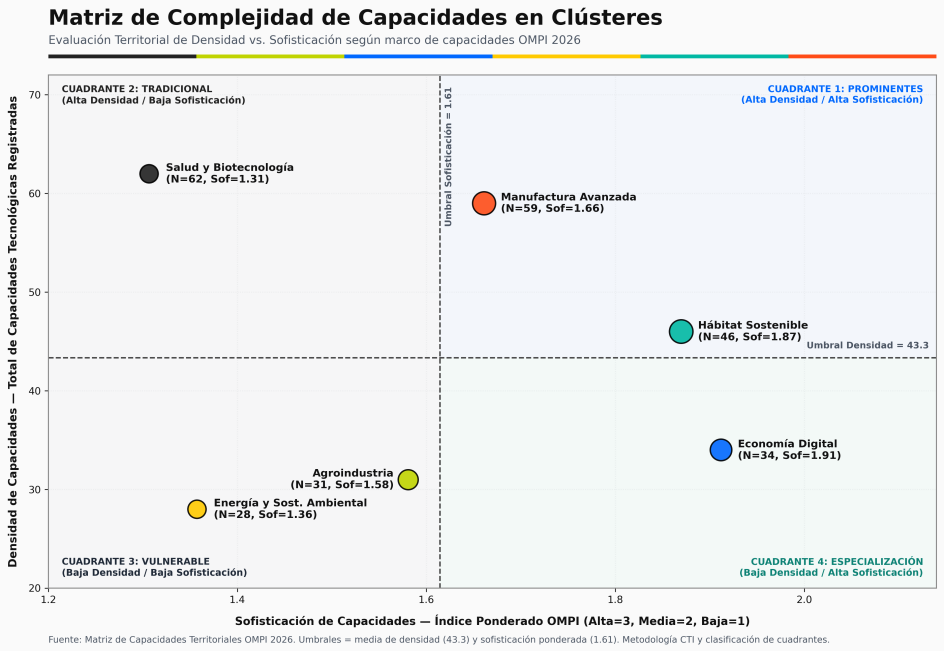


Figura 10: Matriz de Complejidad de Capacidades en Clúster Fuente: elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026.

Para la construcción de la matriz se deben tener en cuenta los ejes y sus respectivos umbrales de densidad y sofisticación. A continuación se explican en detalle los componentes de la matriz (Handbook, 2008).

Definición metodológica de los ejes y umbrales Para construir una matriz 2×2 científicamente reproducible, las variables cualitativas y de conteo deben transformarse en indicadores normalizados.

Eje Y: densidad de capacidades.

- **Definición teórica:** representa la masa crítica y la diversidad de capacidades acumuladas en el clúster. En el informe de la OMPI, la densidad de conocimientos conexos dentro de un ecosistema es un prerrequisito fundamental para habilitar procesos de recombinación, aprendizaje y resiliencia (OMPI, 2026).
- **Operacionalización:** conteo total de capacidades homologadas en el clúster:

$$\text{Densidad}_i = \text{Total_Capacidades}_i = N_{\text{Ciencia}} + N_{\text{Emprendimiento}} + N_{\text{Producción}} + N_{\text{Tecnología}} \tag{57}$$

- **Umbral de corte** (Y_{corte}): media del ecosistema $= 43{,}33$ capacidades (mediana $= 40{,}0$).
  - **Alta densidad** ($Y \geq 43{,}33$): Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida (62), Manufactura Avanzada y Materiales (59), Hábitat Sostenible y Estilo de Vida (46).
  - **Baja densidad** ($Y < 43{,}33$): Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos (34), Agroindustria, Alimentos y Nutrición (31), Energía y Sostenibilidad Ambiental (28).

(Nótese que existe una brecha natural de 12 puntos entre el grupo inferior, de 34, y el superior, de 46.)

El umbral de corte Y_{corte} (densidad de capacidades) es la línea divisoria horizontal que delimita cuándo un clúster posee una masa crítica representativa de capacidades frente al resto del ecosistema. Calculado a partir de la media aritmética del número total de capacidades de los seis clústeres analizados ($Y_{\text{corte}} = 43{,}33$), este parámetro separa a los sectores de **alta densidad** ($Y \geq 43{,}33$), que cuentan con un volumen suficiente de conocimientos para generar economías de escala y dinámicas de recombinación interdimensional, de aquellos de **baja densidad** ($Y < 43{,}33$), cuyas capacidades son aún incipientes o numéricamente reducidas.

El cálculo numérico de Y_{corte} se obtiene mediante la media aritmética del total de capacidades homologadas en los seis clústeres evaluados a partir de los datos registrados. En primer lugar, se toma la cantidad total de capacidades de cada iniciativa:

- Agroindustria, Alimentos y Nutrición (31),
- Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos (34),
- Energía y Sostenibilidad Ambiental (28),
- Hábitat Sostenible y Estilo de Vida (46),
- Manufactura Avanzada y Materiales (59) y
- Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida (62),

La sumatoria da como resultado 260 capacidades acumuladas ($31 + 34 + 28 + 46 + 59 + 62 = 260$). Posteriormente, este valor agregado se divide de manera equitativa entre la cantidad total de sectores analizados ($n = 6$), lo que arroja la operación directa:

$$Y_{\text{corte}} = \frac{260}{6} \approx \mathbf{43{,}33} \tag{58}$$

De esta manera se establece la línea de corte horizontal que separa a los clústeres de gran volumen de aquellos de menor escala numérica (Handbook, 2008).

Eje X: sofisticación de capacidades.

- **Definición teórica:** mide la calidad intrínseca y la complejidad del conocimiento que domina el clúster. Como establece la OMPI, no todas las capacidades aportan el mismo valor: las capacidades complejas (de alta intensidad técnica, conocimiento tácito no ubicuo y alto retorno) son las más difíciles de alcanzar y sostener (Handbook, 2008).

- **Operacionalización (índice ponderado de calidad):** se pondera cada nivel cualitativo (Alta $= 3$, Media $= 2$, Baja $= 1$) y se relativiza frente al tamaño del clúster:

$$\text{Índice de Sofisticación}_i = \frac{3 \cdot N_{\text{Alta}} + 2 \cdot N_{\text{Media}} + 1 \cdot N_{\text{Baja}}}{\text{Total_Capacidades}_i} \tag{59}$$

(Este índice oscila entre $1{,}00$ para un clúster $100\,\%$ de baja complejidad y $3{,}00$ para uno $100\,\%$ de alta complejidad.)

- **Umbral de corte** (X_{corte}): media del ecosistema $= 1{,}614$ (mediana $= 1{,}621$).
  - **Alta sofisticación** ($X \geq 1{,}614$): Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos (1,912), Hábitat Sostenible y Estilo de Vida (1,870), Manufactura Avanzada y Materiales (1,661).
  - **Baja/media sofisticación** ($X < 1{,}614$): Agroindustria, Alimentos y Nutrición (1,581), Energía y Sostenibilidad Ambiental (1,357), Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida (1,306).

El umbral de corte X_{corte} (sofisticación de capacidades) es la línea divisoria vertical que evalúa la calidad técnica y la complejidad cognitiva intrínseca del conocimiento acumulado en cada clúster, independientemente de su volumen. Determinado mediante el promedio del índice ponderado de sofisticación de todo el ecosistema ($X_{\text{corte}} = 1{,}614$, en una escala de $1{,}00$ a $3{,}00$), este punto de corte clasifica a los sectores en el segmento de **alta sofisticación** ($X \geq 1{,}614$), cuando sus capacidades se concentran preponderantemente en actividades complejas, patentes o tecnologías de frontera, y en el segmento de **baja/media sofisticación** ($X < 1{,}614$), cuando su portafolio está mayoritariamente dominado por conocimientos básicos, descriptivos o tradicionales.

El cálculo numérico de X_{corte} se determina calculando primero el índice ponderado de sofisticación individual de cada clúster y promediando luego sus resultados. Para cada clúster se multiplica el número de capacidades según su nivel de complejidad (Alta $\times 3$, Media $\times 2$, Baja $\times 1$) y se divide entre su total de capacidades:

- Agroindustria, Alimentos y Nutrición suma 49 puntos sobre 31 capacidades:

$$\frac{49}{31} \approx 1{,}5806 \tag{60}$$

- Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos, 65 sobre 34:

$$\frac{65}{34} \approx 1{,}9118 \tag{61}$$

- Energía y Sostenibilidad Ambiental, 38 sobre 28:

$$\frac{38}{28} \approx 1{,}3571 \tag{62}$$

- Hábitat Sostenible y Estilo de Vida, 86 sobre 46:

$$\frac{86}{46} \approx 1{,}8696 \tag{63}$$

- Manufactura Avanzada y Materiales, 98 sobre 59:

$$\frac{98}{59} \approx 1{,}6610 \tag{64}$$

- Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida, 81 sobre 62:

$$\frac{81}{62} \approx 1{,}3065 \tag{65}$$

Al sumar los índices de sofisticación de los seis sectores se obtiene un valor acumulado de $9{,}6866$ ($1{,}5806 + 1{,}9118 + 1{,}3571 + 1{,}8696 + 1{,}6610 + 1{,}3065 = 9{,}6866$), el cual se divide entre los 6 clústeres mediante la fórmula:

$$X_{\text{corte}} = \frac{9{,}6866}{6} \approx \mathbf{1{,}6144} \tag{66}$$

Se fijda de esta manera el umbral vertical a partir del cual un clúster califica como de alta sofisticación relativa dentro del ecosistema (Handbook, 2008).

2.9.2 Índice de sofisticación

El Índice de Sofisticación es un indicador sintético de promedio ponderado diseñado para cuantificar el grado o nivel medio de complejidad técnica y valor agregado que posee el portafolio de capacidades de un clúster.

En lugar de contar únicamente cuántas capacidades tiene un clúster (lo que solo mediría volumen o cantidad), este índice evalúa la intensidad de la calidad tecnológica de ese conjunto de conocimientos.

Fundamento conceptual y escala de ponderación En el marco de la complejidad económica de la OMPI y el *Growth Lab* de Harvard, dominar actividades de frontera técnica requiere mayores redes de conocimiento interdependiente, infraestructura especializada y capacidades tácitas difíciles de replicar (Handbook, 2008).

Para reflejar esta jerarquía en una escala métrica continua, se asigna una escala ordinal de pesos a cada categoría cualitativa:

- **Capacidad de sofisticación alta (peso $= 3$):** conocimientos de frontera tecnológica, patentes intensivas, desarrollos de software de alto impacto o manufactura avanzada.
- **Capacidad de sofisticación media (peso $= 2$):** procesos industriales intermedios, ingeniería aplicada, marcas de servicios especializados y metodologías técnicas probadas.
- **Capacidad de sofisticación baja (peso $= 1$):** conocimientos estandarizados, investigación básica o académica descriptiva, actividades comerciales genéricas o bienes primarios.

Formulación matemática.

$$\text{Índice de Sofisticación} = \frac{(3 \cdot N_{\text{Alta}}) + (2 \cdot N_{\text{Media}}) + (1 \cdot N_{\text{Baja}})}{\text{Total de Capacidades del Clúster}} \tag{67}$$

Límites e interpretación del valor.

- **Mínimo teórico ($1{,}00$):** si el $100\,\%$ de las capacidades del clúster fueran de nivel bajo.

$$N_{\text{Baja}} = \text{Total de Capacidades} \Rightarrow \text{Índice} = 1{,}00 \tag{68}$$

- **Punto medio neutro ($2{,}00$):** nivel en el que la calidad promedio de las capacidades es estrictamente intermedia.
- **Máximo teórico ($3{,}00$):** si el $100\,\%$ de las capacidades del clúster fueran de nivel alto.

$$N_{\text{Alta}} = \text{Total de Capacidades} \Rightarrow \text{Índice} = 3{,}00 \tag{69}$$

A continuación se presenta el cálculo exacto del índice de sofisticación a partir del número de capacidades sofisticadas, clasificadas en sofisticación alta, media o baja. Ver Tabla 17.

Tabla 17: Cálculo exacto del índice de sofisticación. Fuente: elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026.

Clúster	Alta ($\times 3$)	Media ($\times 2$)	Baja ($\times 1$)	Puntos totales	Total (N)	Cálculo directo	Índice
Economía Digital	$8{\times}3{=}24$	$15{\times}2{=}30$	$11{\times}1{=}11$	$24{+}30{+}11{=}65$	34	$65/34$	**1,91**
Hábitat Sostenible	$12{\times}3{=}36$	$16{\times}2{=}32$	$18{\times}1{=}18$	$36{+}32{+}18{=}86$	46	$86/46$	**1,87**
Manufactura Avanzada	$11{\times}3{=}33$	$17{\times}2{=}34$	$31{\times}1{=}31$	$33{+}34{+}31{=}98$	59	$98/59$	**1,66**
Agroindustria	$5{\times}3{=}15$	$8{\times}2{=}16$	$18{\times}1{=}18$	$15{+}16{+}18{=}49$	31	$49/31$	**1,58**
Energía	$2{\times}3{=}6$	$6{\times}2{=}12$	$20{\times}1{=}20$	$6{+}12{+}20{=}38$	28	$38/28$	**1,36**
Salud	$2{\times}3{=}6$	$15{\times}2{=}30$	$45{\times}1{=}45$	$6{+}30{+}45{=}81$	62	$81/62$	**1,31**

En general, este índice *evita la distorsión por tamaño (neutralidad de escala)*: si un clúster suma 50 capacidades, pero todas son de nivel bajo, su puntaje cae a $1{,}00$. Por el contrario, un clúster pequeño con pocas capacidades, pero altamente sofisticadas, obtendrá una puntuación cercana a $2{,}00$ o superior.

Igualmente, *establece la frontera objetiva del eje* X: la media general del sistema se ubica en $1{,}61$. Todo clúster por encima de este umbral (Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos; Hábitat Sostenible y Estilo de Vida; y Manufactura Avanzada y Materiales) se clasifica en el cuadrante de **alta sofisticación**, mientras que aquellos por debajo (Agroindustria, Alimentos y Nutrición; Energía y Sostenibilidad Ambiental; y Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida) quedan identificados en el tramo de **baja/media sofisticación**.

Partiendo de todo lo anterior, es recomendable estructurar una tabla consolidada que permita evidenciar el posicionamiento espacial de cada clúster. En la Tabla 18 se evidencian la densidad, los valores previamente tabulados del número de capacidades sofisticadas por cada clúster, el índice de sofisticación y, finalmente, el cuadrante asignado (Handbook, 2008).

Tabla 18: Tabla consolidada de posicionamiento. Fuente: elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026

Clúster	Densidad	Alta	Media	Baja	% Alta + Media	Índice	Cuadrante
Hábitat Sostenible	46	12	16	18	60,87 %	1,87	Q1: Prominentes
Manufactura Avanzada	59	11	17	31	47,46 %	1,66	Q1: Prominentes (frontera)
Salud	62	2	15	45	27,42 %	1,31	Q2: Tradicional
Energía	28	2	6	20	28,57 %	1,36	Q3: Vulnerable
Agroindustria	31	5	8	18	41,94 %	1,58	Q3: Vulnerable (en transición)
Economía Digital	34	8	15	11	67,65 %	1,91	Q4: Especialización

2.9.3 Índice % Alta + Media

En la tabla consolidada de posicionamiento se hace mención a un índice *% Alta + Media*, el cual es importante calcular. El porcentaje % Alta + Media es una métrica de concentración que mide la *proporción de capacidades que superan el umbral básico o elemental* dentro de un clúster.

En términos simples, indica qué porcentaje de todo el conocimiento y las capacidades del clúster corresponde a actividades de valor agregado intermedio o de frontera tecnológica, en lugar de ser capacidades netamente genéricas o de baja complejidad (Handbook, 2008)

Su relevancia se basa en que:

- *Detecta «ilusiones de tamaño»*: el clúster de Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida tiene el mayor número de capacidades del ecosistema ($N = 62$), pero su % Alta + Media es de apenas $27{,}42\,\%$ (es decir, el $72{,}58\,\%$ son capacidades de nivel bajo). Esto evidencia una gran base científica descriptiva que aún no logra traducirse en tecnologías complejas o patentes aplicadas.
- *Identifica clústeres de alta calidad compacta*: aunque el clúster Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos tiene menos masa crítica ($N = 34$), más de dos tercios de sus capacidades ($67{,}65\,\%$) son de sofisticación media o alta, demostrando un perfil tecnológico mucho más calificado para la frontera digital.
- *Complementa el eje* X *de sofisticación*: sirve como control de robustez frente al índice ponderado (Alta $= 3$ + Media $= 2$ + Baja $= 1$), ya que muestra de forma intuitiva qué tan libre de capacidades básicas o tradicionales está la cartera de un clúster.

Fórmula para calcular el % Alta + Media.

$$\%(\text{Alta} + \text{Media}) = \left(\frac{\text{Capacidades de Sofisticación Alta} + \text{Capacidades de Sofisticación Media}}{\text{Total de Capacidades del Clúster}} \right) \times 100 \quad (70)$$

También equivale al complemento del porcentaje de capacidades bajas:

$$\%(\text{Alta} + \text{Media}) = 100\,\% - \%\text{Baja} \quad (71)$$

2.9.3.1 Significado conceptual según el marco de complejidad económica

En el marco metodológico de la OMPI y el *Growth Lab* de Harvard, las capacidades se categorizan según la dificultad de replicarlas, su intensidad técnica y el valor que generan (OMPI, 2026):

- **Capacidades bajas (B):** conocimientos fundacionales, modulares o estandarizados (por ejemplo, investigación académica descriptiva, productos primarios o marcas de consumo directo sin barrera tecnológica alta).
- **Capacidades medias (M) y altas (A):** capacidades técnicas aplicadas, procesos industriales especializados, patentes complejas y servicios basados en conocimiento intensivo.

Por lo tanto, **% Alta + Media** responde a la pregunta: *«De cada 100 capacidades que domina este clúster, ¿cuántas representan conocimientos avanzados o intermedios con potencial de diferenciación y competitividad?»*

Los valores desglosados por cada clúster (partiendo de la cantidad de capacidades sofisticadas), donde se calcula el **% Alta + Media**, se pueden ver en la Tabla 19.

Tabla 19: Cálculo del % Alta + Media. Fuente: elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial, 2026.

Clúster	Alta	Media	Baja	Total	Cálculo	% Alta + Media
Economía Digital	8	15	11	34	$(8+15)/34 = 23/34$	**67,65 %**
Hábitat Sostenible	12	16	18	46	$(12+16)/46 = 28/46$	**60,87 %**
Manufactura Avanzada	11	17	31	59	$(11+17)/59 = 28/59$	**47,46 %**
Agroindustria	5	8	18	31	$(5+8)/31 = 13/31$	**41,94 %**
Energía	2	6	20	28	$(2+6)/28 = 8/28$	**28,57 %**
Salud	2	15	45	62	$(2+15)/62 = 17/62$	**27,42 %**

2.9.4 Complejidad por clúster

A continuación se presenta el análisis para cada uno de los seis clústeres. Las explicaciones integran la evidencia cuantitativa de las bases homologadas con los principios de complejidad económica, interconectividad dimensional y fallas de traslación expuestos en el informe *Perspectivas sobre las capacidades de innovación* (OMPI, 2026).

Hábitat Sostenible y Estilo de Vida

Se consolida como uno de los motores más integrales y sofisticados del ecosistema. Su posición en el Cuadrante 1 no responde a un mero volumen bruto, sino a una sincronía armónica entre masa crítica y profundidad técnica:

- **Conectividad interdimensional efectiva:** a diferencia de sectores que sufren aislamientos dimensionales, Hábitat articula con fluidez la investigación básica con la comercialización y la solución técnica aplicada (12 capacidades científicas, 12 tecnológicas y 21 marcas de emprendimiento).

- **Dominio tecnológico complejo:** el clúster registra 8 capacidades tecnológicas de nivel Alto (como *Sistemas de suministro de agua*, *Manejo de productos de combustión*, *Separación de líquidos y planchas de impresión*, entre otros) combinadas con capacidades de mercado de alto valor en *Aparatos de calefacción/secado*, *Tratamiento de materiales* y *Química industrial*.
- **Sustento teórico (OMPI, 2026):** el informe destaca que los ecosistemas logran un rendimiento superior cuando conectan el emprendimiento con la tecnología para crear soluciones de mercado sofisticadas. Hábitat Sostenible y Estilo de Vida no solo posee masa crítica, sino que más del $60\,\%$ de sus conocimientos se sitúan en niveles intermedios y avanzados, configurándolo como un clúster líder con capacidad para impulsar derrames tecnológicos hacia el resto de la economía local.

Manufactura Avanzada y Materiales

Es la columna vertebral de la infraestructura física del sistema. Se posiciona en el cuadrante de Prominentes, con un perfil de base sólida y frontera tecnológica activa:

- **Articulación de la dimensión productiva:** es el clúster con la mayor participación en la dimensión de Producción ($N = 6$, con capacidades medias en *Automóviles de pasajeros*, *Manufacturas de cobre/aluminio* y *Metales preciosos*), lo que le permite anclar el conocimiento al comercio industrial tangible.
- **Potencial tecnológico aplicado:** cuenta con 12 capacidades tecnológicas (8 de ellas Altas, como *Procesos de separación de líquidos*, *Tratamiento de pigmentos* y *Manejo de combustión*), respaldadas por 12 capacidades de mercado en emprendimiento (marcas) y una amplia base científica (29 publicaciones en física aplicada y biomateriales).
- **Sustento teórico (OMPI, 2026):** el reporte subraya que las capacidades de producción y manufactura avanzada son las más difíciles de descentralizar a nivel mundial debido a los encadenamientos que exigen. Al superar el umbral de sofisticación ($1{,}66$ frente a $1{,}61$) y ostentar 59 capacidades, el clúster posee la escala y la complejidad necesarias para fungir como plataforma habilitadora de otros sectores. Su reto radica en continuar elevando el $52\,\%$ de capacidades bajas hacia estándares industriales de mayor frontera.

Salud, Biotecnología y Ciencias de la Vida

El clúster de Salud representa el caso arquetípico del «desajuste traslacional» documentado ampliamente en el informe OMPI 2026 para economías en desarrollo y de América Latina:

- **Hipertrofia científica vs. atrofia tecnológica:** concentra la mayor cantidad de capacidades del ecosistema ($N = 62$), pero 49 de ellas (el $79\,\%$) provienen de publicaciones científicas (*estudios epidemiológicos y clínicos descriptivos*) categorizados como de baja complejidad relativa frente a patentes globales.
- **Cuello de botella en la invención y protección:** apenas registra 6 capacidades tecnológicas (en patentes como *Química combinatoria* y *Aplicaciones cosméticas*) y carece de patentes en frontera dura farmacéutica (apenas 2 capacidades altas en todo el clúster: *Ácidos nucleicos en producción* y *Técnicas de imagen digital en ciencia*).
- **Sustento teórico (OMPI, 2026):** el informe evidencia que la ciencia básica es el punto de entrada más accesible internacionalmente, pero solo el $10\,\%$ de las economías logran convertir sus conocimientos biomédicos en invenciones patentables de alto impacto. Este clúster exhibe una gran masa crítica de investigación descriptiva que permanece confinada en el laboratorio o la academia, ubicándose en el cuadrante tradicional debido a su bajo aprovechamiento de la traslación tecnológica compleja.

Energía y Sostenibilidad Ambiental

Se encuentra en la posición más crítica y rezagada de la matriz, caracterizada por una doble debilidad estructural:

- **Ausencia absoluta de capacidades tecnológicas propias:** el clúster registra cero (0) capacidades tecnológicas patentables. Toda su base reposa en 19 líneas de investigación académica descriptiva (biodiversidad, cambio climático, geociencias, todas clasificadas como de sofisticación baja) y 8 marcas comerciales de soporte.
- **Aislamiento y baja diversidad:** con solo 28 capacidades totales, no alcanza la masa crítica mínima para detonar

economías de escala ni procesos de recombinación de saberes.

- **Sustento teórico (OMPI, 2026):** el informe explica que las tecnologías energéticas (como aerogeneradores, sistemas solares o almacenamiento de energía) demandan una densidad muy alta de conocimientos multidisciplinarios complementarios en ingeniería y materiales. Al depender exclusivamente de ciencias ambientales descriptivas y explotación extractiva tradicional (petróleo crudo, energía eléctrica), el clúster es altamente vulnerable a la obsolescencia y requiere una intervención urgente de política pública para inyectar capacidades tecnológicas antes de intentar diversificarse hacia campos complejos.

Agroindustria, Alimentos y Nutrición

Aunque formalmente queda en el Cuadrante 3 debido a su baja densidad agregada ($N = 31$) y a que su índice ($1{,}58$) está ligeramente por debajo del corte ($1{,}61$), Agroindustria es un clúster en clara trayectoria de despegue y sofisticación:

- **Fuerte orientación tecnológica en su núcleo:** de sus 11 capacidades tecnológicas, 5 son de sofisticación Alta (*Alimentación animal*, *Chocolate y confitería*, *Procesamiento de frutas/verduras*, *Producción de azúcar* y *Proteínas alimentarias*) y 5 son Medias (*Fermentación*, *Lácteos*, *Conservación*). Esto demuestra un esfuerzo real por trascender la agricultura primaria hacia la biotransformación alimentaria avanzada.
- **Lastre de la investigación básica y la extracción primaria:** lo que frena su índice de sofisticación global es su bloque científico (12 capacidades en biodiversidad y recursos hídricos catalogados como bajos) y su perfil primario de exportación (*Otros subproductos animales*).
- **Sustento teórico (OMPI, 2026):** el documento resalta que los dominios agropecuarios tradicionales se tornan complejos únicamente cuando incorporan procesamiento molecular y tecnología de alimentos. Agroindustria tiene una «afinidad» alta para convertirse rápidamente en un clúster de Especialización (Cuadrante 4): ya domina la tecnología de proceso; solo requiere consolidar masa crítica y articular sus patentes con esquemas de comercialización internacional.

Economía Digital, Software y Servicios Tecnológicos

Personifica la estrategia de «Especialización Inteligente y Nicho de Alto Valor»:

- **Máxima calidad cognitiva del portafolio:** más de dos tercios ($67{,}65\,\%$) de sus capacidades son de nivel medio o alto. En ciencia domina campos avanzados como *Técnicas de imagen digital y reconstrucción* (Alta) y *Teoría institucional y comportamiento* (Alta); en tecnología cuenta con procesos avanzados de separación y combustión; y en emprendimiento lidera con marcas intensivas en servicios comerciales, software y tratamiento de materiales.
- **Perfil compacto pero ágil:** con 34 capacidades, no posee la masividad de Salud o Manufactura, pero evita la dispersión en actividades genéricas de bajo impacto, concentrando sus esfuerzos en activos intangibles y servicios intensivos en conocimiento.
- **Sustento teórico (OMPI, 2026):** de acuerdo con el informe de la OMPI, los ecosistemas que no pueden abarcar una hiperdiversidad de campos obtienen rendimientos extraordinarios al especializarse selectivamente en capacidades de frontera digital y protegerlas mediante conocimientos complementarios de mercado. Economía Digital está posicionado exactamente en esta frontera: tiene una sofisticación destacada y un alto dinamismo de comercialización; su ruta estratégica debe consistir en ganar densidad (atraer más capacidades complejas) para cruzar hacia el Cuadrante 1 (Prominentes).

Aviso sobre el uso de inteligencia artificial

Este documento fue desarrollado con apoyo de herramientas de inteligencia artificial (IA), incluyendo sistemas de generación de texto e imagen. Los contenidos generados fueron revisados por los autores responsables, pero podrían contener errores o sesgos propios de estos modelos. El uso de datos personales en procesos de IA se ajusta a lo establecido por la Ley 1581 de 2012 y la Circular Externa 002 de 2024 de la SIC, aplicando principios de transparencia, necesidad y proporcionalidad. Las imágenes o textos generados por IA no constituyen, por defecto, obras protegidas por derechos de autor. Ante dudas, se recomienda consultar al área legal o de propiedad intelectual. Las decisiones finales reflejan el juicio humano, no reemplazado por IA. Su uso fue supervisado conforme a estándares éticos, técnicos y legales vigentes.

Nuestras fuentes

ACI. (2026a). Invest in Medellin.

ACI. (2026b). Sectores Priorizados Propuestas.

Alcaldía de Medellín. (2025). Plan del Sistema Distrital de CTI para la Sostenibilidad 2024–2033:Plan Decenal de CTi.

Alcaldía de Medellín. (2026a). Plan de Fortalecimiento de Capacidades y Desarrollo de Talento para Vocaciones.

Alcaldía de Medellín. (2026b). Plan Maestro Distrito Inteligente - DNP (2024).

ANDI. (2026). Colombia Innova 2026.

Breakthrough. (2023). Antioquia Emergente.

CCMA. (2024). Perfil socioeconómico Valle Aburrá.

CCMA. (2025). Informativo.

CCMA. (2026). Antioquia una Economía Resiliente.

Consejo Privado de Competitividad. (2026). Índice Departamental de Competitividad.

DNP. (2024). CONPES 4130 — Política para Impulsar la Vocación del Distrito Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTI) de Medellín.

Fenalco Antioquia. (2026). Sectores.

Forbes Colombia. (2025). Los grandes proyectos que están jalonando la inversión en Medellín.

Global Green Growth Institute. (2026). Antioquia Biocompetitiva.

Go, D. J., Promentilla, M. A., Aviso, K., & Yu, K. D. (2019). The evolution of the key sectors in the Philippine economy using an AHP-based sector prioritization index. *Economies*, *7*(3), 78.

Gobernación de Antioquia. (2026). Antójate de Antioquia.

Handbook, O. (2008). Handbook on constructing composite indicators: Methodology and userguide.

MSCI, S. (2026). Global industry classification standard (GICS) methodology. *New York, NY, USA: MSCI*.

OMPI. (2026). Perspectivas sobre las capacidades de innovación 2026.

Proantioquia. (2026). Diez Movidas Estratégicas 2026–2030.

PwC. (2026). Guía de inversión de Antioquia 2026.

RutaN. (2026a). Informe de Convergencia Local.

RutaN. (2026b). Trayectorias y capacidades del ecosistema de conocimiento de Medellín.

Sectorial. (2025). Sectores.

Tapia, C. E. F., González, M. d. C. P., Ávila, F. J. M., & Cevallos, K. L. F. (2024). Priorización de sectores productivos clave en las economías locales. *Revista de ciencias sociales*, *30*(3), 66-80.

Vamos, M. C. (2025). Calidad de Vida.