

Universidad de Matanzas
Facultad de Ingeniería Industrial
Departamento Industrial



**INSTRUMENTO METODOLÓGICO PARA LA
EVALUACIÓN DE LA GESTIÓN AMBIENTAL
EMPRESARIAL BASADO EN ÍNDICE
SINTÉTICO**

Autora: MSc. Ing. Liz Pérez Martínez

Matanzas/2022

Universidad de Matanzas
Facultad de Ingeniería Industrial
Departamento Industrial



**INSTRUMENTO METODOLÓGICO PARA LA
EVALUACIÓN DE LA GESTIÓN AMBIENTAL
EMPRESARIAL BASADO EN ÍNDICE SINTÉTICO**

**Tesis presentada en opción al grado científico de
Doctor en Ciencias Técnicas**

Autora: MSc. Ing. Liz Pérez Martínez

Tutores: Dr.C. Dianelys Nogueira Rivera

Dr.C. Juan Alfredo Cabrera Hernández

Consultante: Dr.C. Orlando Santos Pérez

Matanzas/2022

***"Lo que no se mide,
no se puede mejorar"***

William Thomson Kelvin (Lord Kelvin)

a Iti

Agradecimientos

La culminación de esta investigación constituye el cierre de un importante período en mi formación profesional, a la vez que supone el inicio de una nueva etapa como investigadora, lo cual no hubiese sido posible sin el apoyo y colaboración de un grupo de personas a las que les dedico mi más sincero agradecimiento en estas líneas.

A mi abuela, porque este era su sueño.

A mis padres (sobran las palabras), este logro es por ellos, para ellos y, sobre todo, ¡gracias a ellos!

Mis agradecimientos especiales a mis tutores: a Alfredo que desde el principio confió en mí, a pesar de los dolores de cabeza que le ocasioné; a Dianelys que no fue solo mi tutora, sino mi ángel de la guarda, que estuvo a mí disposición siempre que la necesité; y a Orlando, que llegó a esta investigación en el momento oportuno y que fue el empuje que necesitaba. Por su esfuerzo y dedicación, por cederme parte de su tiempo y por no rendirse conmigo, infinitas gracias.

A mi hermano, por quererme tanto. A mis sobrinitas, Sandra incluida, que siempre saben cómo hacerme volver a mi niñez. Al resto de mi familia, especialmente a mi tía Julita y a Mayi.

A mis amigas de toda la vida (Yelenny, Yahiremys, Saybelis y Larisa), que pese al tiempo y la distancia siguen siendo incondicionales.

A mi hermana de la vida, Irina, por ser un pilar en mi vida, mi confidente y consejera, mi Pepe Grillo.

A Lety por el empujón, a Adrián y Ailet por las risas, a Cuquito por ser Cuquito, a los abuelos adoptivos y a Osma, hasta por la disociación.

A "mis niños" (Eduardo, Manuel Alejandro y Adrián), por su apoyo, por ser mis apaga fuegos, por contribuir a esta investigación y confiar en mí para su formación profesional, este logro, sin dudas, también es de ellos.

A todos aquellos que han formado parte de este proceso, que se han preocupado y han sido apoyo, a Any, Yamy, Enma, Dairo, Luis Miguel, Oda, Ale, Guille, Yoe, Yumi, Digxán, los Alain, Adnielys, Yoan, Elianys, Nelvis, entre otros muchos que estuvieron en las distintas etapas de esta investigación y de mi vida, amigos todos.

A mis compañeros y amigos de la Universidad de Matanzas, mi especial cariño a Telot por tantos años de profesión y afecto compartidos, a Yanlis, Naylén y Karina por su amistad demostrada, y a los colegas de la Facultad de Ciencias Técnicas en general, porque nuestra relación no es "solo cosas de trabajo".

Agradecer además a todos los que de una u otra manera se preocuparon por mí, a aquellos que en algún momento me preguntaron *¿cómo va la tesis?*

Síntesis

La necesidad de adoptar adecuados enfoques empresariales para lograr un mejor desempeño ambiental constituye una tarea inminente del sistema empresarial cubano. La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un instrumento metodológico para la evaluación de la gestión ambiental empresarial basado en índice sintético, validado mediante técnicas de minería de datos. La aplicación de técnicas de minería de datos permitió capturar los patrones pasados y replicarlos, además de realizar estimaciones con datos nuevos o fuera de muestra así como, inferir comportamientos y resultados futuros, en aras de anticipar posibles situaciones de deterioro que comprometan la sostenibilidad ambiental. El instrumento resultó en el diseño e implementación de un modelo conceptual, su procedimiento general y los procedimientos específicos asociados, que permiten la determinación del estado de la gestión ambiental, diagnóstico, evaluación y propuesta de mejoras al funcionamiento de las variables analizadas mediante la construcción de un índice sintético para la gestión ambiental empresarial. La consistencia lógica del instrumento metodológico se comprobó mediante el uso de redes de Petri; su pertinencia y utilidad con la evaluación del Índice de Iadov; y la comprobación empírica de su contribución a la gestión ambiental empresarial se realizó mediante el caso de estudio en la Empresa Comercializadora de Combustible de Matanzas. Se aplicaron test de validación del procedimiento y se realizó una simulación que permitió, comprobar la factibilidad de su implementación como contribución a la gestión ambiental empresarial y estructurar de forma lógica un grupo de herramientas para su evaluación.

Índice de Contenido

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE Y LA PRÁCTICA DE LA GESTIÓN AMBIENTAL EMPRESARIAL	10
1.1. La gestión ambiental en el contexto empresarial	10
1.1.1. Gestión ambiental. Generalidades	12
1.1.2. Gestión ambiental empresarial.....	14
Procederes, metodologías, modelos e instrumentos para la evaluación de la gestión ambiental empresarial.....	16
1.1.3. Marco legal regulatorio de la gestión ambiental empresarial	17
1.2. Control de gestión: índices sintéticos.....	20
1.2.1. Indicadores e índices sintéticos	22
Indicadores ambientales	25
Indicadores de gestión ambiental.....	27
Índices sintéticos de gestión ambiental	28
1.2.2. Métodos de construcción de índices sintéticos	30
1.3. Inteligencia artificial: aplicación a la construcción de índices sintéticos.....	34
1.3.1. Minería de datos.....	34
1.3.2. Datos ambientales.....	37
1.4. Conclusiones parciales.....	38
CAPÍTULO 2: INSTRUMENTO METODOLÓGICO PARA LA EVALUACIÓN DE LA GESTIÓN AMBIENTAL EMPRESARIAL	40
2.1. Concepción teórica y metodológica del modelo conceptual.....	40
2.1.1. Descripción del modelo conceptual.....	41
2.2. Procedimiento general para la implementación del modelo conceptual.....	43
2.2.1. Premisas para la aplicación del procedimiento.....	43
2.2.2. Descripción del procedimiento general	43
2.3. Procedimientos específicos asociados al procedimiento	47
2.3.1. Procedimiento para el levantamiento de la información inicial de la gestión ambiental empresarial.....	47

Etapa 1. Determinación de los indicadores	48
Etapa 2. Elaboración de las fichas técnicas de los indicadores y de la Base de Datos de Indicadores	55
2.3.2. Procedimiento para la construcción del ISGAE mediante minería de datos	56
Etapa 1. Integración y recopilación.....	57
Etapa 2. Selección, limpieza y transformación	59
Etapa 3. Minería de datos	60
Etapa 4. Evaluación e interpretación	62
Etapa 5. Difusión y empleo.....	63
2.3.3. Procedimiento para el pronóstico del comportamiento del ISGAE mediante minería de datos.....	64
Etapa 1. Simulación	64
Etapa 2. Aplicación	68
2.4. Validación teórica del procedimiento general	70
2.4.1. Análisis de la consistencia lógica del procedimiento con el uso de las redes de Petri.....	70
2.4.2 Evaluación de la utilidad y la factibilidad de uso del procedimiento a través de la técnica ladov.....	71
2.5. Conclusiones parciales.....	72
CAPÍTULO 3: APLICACIÓN DEL INSTRUMENTO METODOLÓGICO PARA LA EVALUACIÓN DE LA GESTIÓN AMBIENTAL EMPRESARIAL BASADO EN ÍNDICE SINTÉTICO	74
3.1. Comprobación de las premisas.....	74
3.2. Resultados de la implementación del procedimiento general para la determinación del ISGAE	75
Fase 1. Preparación para la implementación	75
Etapa 1.1. Diagnóstico ambiental.....	77
Fase 2. Gestión ambiental empresarial.....	73
Etapa 2.1. Determinación de los indicadores ambientales.....	73
Fase 3. Implementación del modelo de gestión ambiental empresarial	90
Etapa 3.1. Contribución al proceso de toma de decisiones	90

Etapa 3.2. Propuestas de mejoras	91
Etapa 3.3. Divulgación de los resultados.....	92
3.3. Conclusiones del capítulo.....	96
CONCLUSIONES	98
RECOMENDACIONES.....	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
ANEXOS.....	I

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Ficha de presentación del indicador.....	55
Tabla 3.1. Variables estandarizadas.....	76
Tabla 3.2. Escala Hedónica.....	83
Tabla 3.3. Muestra de los datos (ejemplo para un año específico).	84
Tabla 3.4. Resultados de pruebas estadísticas en la serie original.....	86
Tabla 3.5. Resultados de pruebas estadísticas en la serie transformada.	86
Tabla 3.6. Resultados de la prueba estadística a los modelos.	88
Tabla 3.7. Resultados de AIC en los modelos ARIMA.....	89
Tabla 3.8. Predicciones para el año 2021 por variables (indicadores).....	89
Tabla A.1.3.1. Reseña de algunas iniciativas de indicadores ambientales.	XVII
Tabla A.2.2.1. Resumen ladov.....	XXIII
Tabla A.3.2.1. Matriz de datos.....	XL
Tabla A.3.2.2. <i>p-values</i> de $R(X)$	XL
Tabla A.3.2.3. Autovalores de $R(X)$	XLI
Tabla A.3.2.4. Autovectores de $R(X)$	XLI
Tabla A.3.2.5. Resumen PCA	XLII

Índice de Figuras

Figura 1.1. Hilo conductor del marco teórico referencial de la investigación.....	10
Figura 2.1. Modelo de Gestión Ambiental Empresarial mediante el ISGAE.....	43
Figura 2.2. Procedimiento general para la implementación del modelo.....	44
Figura 2.3. Modelo conceptual P-E-I-R en la gestión ambiental empresarial.....	45
Figura 2.4. . Procedimiento para el levantamiento de la información inicial de la gestión ambiental empresarial.	47
Figura 2.5. Procedimiento para la construcción del ISGAE.	57
Figura 2.6. Rangos de valoración del ISG.	72
Figura 3.1. Datos normalizados con estructura data frame	75
Figura 3.2. Correlaciones en los ejes de los componentes.....	77
Figura 3.3. Gráfico del árbol de decisión generado.	82
Figura 3.4. Correlaciones entre las variables de los indicadores.....	83
Figura 3.5. Evaluación del ISGAE en la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas	84
Figura 3.6. Gráfico de secuencia.....	85
Figura 3.7. Gráfico de secuencia de la serie transformada.....	87
Figura 3.8. Pronóstico de comportamiento del ISGAE en la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas.....	90
Figura 3.9. Vista web del Observatorio Ambiental Costatenas	95
Figura A.2.1.1. Modelación del procedimiento mediante redes de Petri.	XXII
Figura A.3.2.1. Matriz de Información.	XXXIV
Figura A.3.2.2. Matriz de variables centradas.	XXXIV
Figura A.3.2.3. Cálculo de $V(X)$ de forma manual.	XXXV
Figura A.3.2.4. Cálculo de $V(X)$. con R	XXXVI
Figura A.3.2.5. Matriz de variables estandarizadas.....	XXXVI
Figura A.3.2.6. Cálculo de $R(X)$ de forma manual.	XXXVII
Figura A.3.2.7. Cálculo de $R(X)$ con R.	XXXVII
Figura A.3.2.8. Histograma de $R(X)$ con R.....	XXXVIII

Figura A.3.2.9. Correlaciones de R(X) con R.	XXXIX
Figura A.3.2.10. Gráfico de Sedimentación con autovalores.....	XLII
Figura A.3.2.11. Gráfico de Sedimentación con varianza.....	XLIII
Figura A.3.2.12. Correlaciones en los ejes de los componentes (Dimensiones 1 y 2).	XLV
Figura A.3.2.13. Correlaciones en los ejes de los componentes (Dimensiones 3 y 4).	XLVI
Figura A.3.2.14. Correlaciones en los ejes de los componentes (Dimensiones 5 y 6).	XLVI
Figura A.3.2.15. Correlaciones en los ejes de los componentes (Dimensiones 7 y 8).	XLVII
Figura A.3.2.16. Correlaciones en los ejes de los componentes (todas las dimensiones).	XLVII
Figura A.3.2.17. Análisis factorial. Modelo 2 Factores.....	L
Figura A.3.2.18. Análisis factorial. Modelo 3 Factores.....	LII
Figura A.3.2.19. Análisis factorial. Modelo 4 Factores.....	LIII
Figura A.3.3.1. Flujo de la información en el OBSAM-Costatenas.	LV

Índice de Cuadros

Cuadro 3.1. Sistema de indicadores desarrollados.....	80
Cuadro A. I.1 (a). Vínculos y publicaciones de las principales iniciativas de indicadores ambientales. América Latina y el Caribe.....	I
Cuadro A. I.1 (b). Vínculos y publicaciones de las principales iniciativas de indicadores ambientales. Países Desarrollados.....	V
Cuadro A.1.1.1. Definiciones de Gestión Ambiental.....	XI
Cuadro A.1.2.1. Principales áreas de aplicación de los índices sintéticos.....	XII
Cuadro A.1.3.1. Lista de datos ambientales comúnmente disponibles.....	XVI
Cuadro A.1.3.2. Índices Ambientales.....	XX
Cuadro A.1.3.3. Reportes ambientales más importantes.....	XXI
Cuadro A.2.2.1. Cuadro Lógico de ladov empleado.....	XXIII
Cuadro A.3.1.1. Encuesta a expertos en gestión ambiental.....	XXXII

Índice de Anexos

Anexo 1.1. Vínculos y publicaciones de las principales iniciativas de indicadores ambientales.....	I
América Latina y el Caribe.....	I
Países Desarrollados.....	V
Anexo 1.1. Definiciones de Gestión Ambiental dadas por diversos autores	XI
Anexo 1.2. Aplicaciones de los Índices Sintéticos en diversos sectores y áreas	XII
Anexo 1.3. Pirámide de la Información Ambiental.	XVI
a) Datos ambientales.....	XVI
b) Indicadores ambientales.....	XVII
c) Índices ambientales.	XX
d) Conocimiento ambiental para la toma de decisiones.	XXI
Anexo 2.1. Modelación del procedimiento mediante redes de Petri.....	XXII
Anexo 2.2. Desarrollo de la técnica ladov	XXIII
Anexo 3.1.a. Manifiesto interés de las empresas en la aplicación del procedimiento.	XXIV
Anexo 3.1.b. Apoyo del Citma para la aplicación del procedimiento en las empresas.	XXV
Anexo 3.2. Procedimiento para la jerarquización y/o reducción de los “Indicadores Ambientales Ciclo 2016-2020”.	XXVI
Anexo 3.3. Procedimiento completo para el cálculo del ISGAE con RStudio.....	XXXIII
Anexo 3.4. Flujo de la información en el OBSAM-Costatenas.....	LV

INTRODUCCIÓN

La preocupación por los problemas ambientales se hizo evidente a mediados del siglo XX, como consecuencia de la contaminación provocada por el acelerado desarrollo industrial. Comenzaron entonces a difundirse una serie de ideas que cuestionaban el modelo de crecimiento económico imperante, sus implicaciones en la degradación del ambiente y la afectación de los recursos naturales (Pearce, 1995). Vino luego la conferencia de las Naciones Unidas llamada Cumbre de la Tierra celebrada en Río de Janeiro en 1992 donde se inicia la etapa más importante por una mayor cultura y gestión ambiental. El logro más trascendental alcanzado radicó en que se creó un aumento de la conciencia acerca de los problemas ambientales y de los vínculos entre medioambiente, economía y la sociedad (Pérez-Martínez et al., 2019).

La Organización Internacional de Normalización (ISO) unió a sus líneas la serie de normas ISO 14000 incluida la Norma ISO 14001 que expresa cómo establecer un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) efectivo (Hewitt et al., 1999). En septiembre de 2015 se publica la última versión de esta norma, con un enfoque hacia una gestión ambiental estratégica, el liderazgo como factor de éxito y la actitud proactiva en la protección del medioambiente.

En Cuba, las concepciones de estrategia y gestión ambiental empresarial se convierten, cada vez más, en procesos enfocados a enfrentar asuntos importantes para las organizaciones, aspecto esencial para una gestión ambiental efectiva y el logro de la estrategia ambiental a nivel territorial y nacional.

El Decreto 281/2013 (Reglamento para la implantación y consolidación del Sistema de Dirección y Gestión Empresarial Estatal) (Decreto No. 281, 2013), dedica su Capítulo VIII a los Sistemas de Gestión Ambiental, y en su introducción se plantea que: “La incorporación de la gestión ambiental en los procesos productivos y de servicios, de las empresas que aplican el Sistema de Dirección y Gestión, tiene el propósito de prevenir, reducir, finalmente eliminar los impactos negativos que estos procesos causan al medioambiente, y asegurar la protección y preservación de los recursos naturales sobre los cuales se sustentan la producción de bienes y servicios. Es una necesidad insoslayable de las empresas proteger el ambiente”.

En la Conceptualización del Modelo Económico y Social Cubano de Desarrollo Socialista se hace alusión particular al uso racional y la protección de los recursos y el medioambiente. Por su parte, en el Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta el 2030 se enfatiza en el eje estratégico número dos: transformación productiva e inserción internacional, el fortalecimiento de la competitividad, diversificación y sostenibilidad del sector del turismo; y en el eje estratégico número cinco: recursos naturales y medioambiente, se alienta a promover e implementar modalidades de

consumo y producción sostenibles. El Modelo Económico y Social Cubano de Desarrollo Socialista contiene, entre sus objetivos específicos, la disminución de la vulnerabilidad del país ante los efectos del cambio climático mediante la ejecución gradual del Plan de Estado para el enfrentamiento al cambio climático, conocido como Tarea Vida. Tal y como queda referido en los documentos del 7mo. Congreso del Partido aprobados por el III Pleno del Comité Central del PCC el 18 de mayo de 2017 y respaldados por la Asamblea Nacional del Poder Popular el 1 de junio de 2017, (CC-PCC, 2017) y ratificado en el 8vo. Congreso del Partido (CC-PCC, 2021).

En los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución para el período 2016 – 2021 se expone la política para la preservación del medioambiente. La nueva Constitución de la República de Cuba, aprobada en referendo popular el 24 de febrero de 2019 se refiere en su Capítulo II, a la promoción de la protección y conservación del medioambiente y el enfrentamiento al cambio climático, y deja claro que el Estado protege el medioambiente y reconoce su estrecha vinculación con el desarrollo sostenible de la economía y la sociedad. A decir de Felicori Castro (2019), Cuba, como país, presta especial atención al diseño e implementación de las estrategias ambientales y sus impactos y la adaptación al cambio climático.

En los últimos años, los aspectos ambientales –estado del medioambiente, tendencias y políticas– y sus vinculaciones con los aspectos económicos y sociales, especialmente en el marco del desarrollo sustentable, han recibido, y reciben cada vez más atención por parte de autoridades nacionales e internacionales. Al mismo tiempo, se realizan importantes esfuerzos para diseñar e implementar indicadores e índices que permitan medir y monitorear variables ambientales y su relación con los aspectos sociales y económicos del desarrollo sustentable, de acuerdo con el Informe de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas (2017). Sin embargo, aún no existen indicadores ambientales globales (equivalentes al Producto Interno Bruto (PIB) o al Índice de Desarrollo Humano (IDH)), o empresariales que faciliten la comparación entre países, regiones u organizaciones, basados en información y criterios comunes, aunque existen muchas iniciativas en este sentido (Anexo I.1).

Las iniciativas de indicadores ambientales revisadas no son propuestas integradas o coordinadas, sino para responder a temas específicos (indicadores de agua dulce, de biodiversidad, de desertificación, entre otros), y generalmente de escala local. Indicadores de nivel regional requieren la atención de temas de agregación, armonización y regionalización de los datos que alimentan los indicadores. Lo mismo sucede con los indicadores de perfil empresarial que poseen carácter fragmentado,

descriptivo y subjetivo, lo que dificulta su integración y análisis (Pérez Martínez & Hernández Carrión, 2019).

Sobre esta base, los sistemas de indicadores poseen el potencial de constituir importantes herramientas en la comunicación de la información científica y técnica. Esto se sintetiza en un monitoreo permanente de las variables y sistemas ambientales, en aras de una evaluación de la sostenibilidad ambiental, a través de la selección de un conjunto de parámetros especialmente diseñados para obtener información específica, según objetivos predeterminados, de algún aspecto considerado prioritario de la relación sociedad- entorno natural (Pérez Martínez & Rivero Muñiz, 2017).

Son numerosas las ocasiones en que está latente la ocurrencia de problemas relacionados con la obtención de resultados estadísticamente significativos, derivados del empleo inapropiado de técnicas estadísticas y econométricas, además de la recurrente ausencia de datos o en otros casos, la duplicidad de los mismos. Luego, se está en presencia de modelos econométricos muy útiles, desde el punto de vista de las relaciones de causalidad que describen, pero que pierden su fuerza al mostrar resultados pobres en sus parámetros estadísticos formales o al utilizarse para plazos largos, cuestión no concebida para algunos de estos modelos. Es en este sentido, que los modelos de clasificación y pronóstico basados en minería de datos son apropiados para tratar problemas que tienen evidentes relaciones no lineales a largo plazo y donde se requieren pronósticos con un elevado nivel de fiabilidad formal (bondad del ajuste) y confiabilidad (apropiada selección de variables a relacionar) (Pérez Martínez, Naranjo Rey, *et al.*, 2021).

El progresivo crecimiento de las ciudades, el desarrollo de la industrialización, y en definitiva la civilización actual, provocan sobre el entorno natural una serie de procesos negativos encaminados hacia un deterioro y desequilibrio ecológico que, de no tomar las debidas medidas a tiempo, puede resultar irreversible. La industrialización es un factor decisivo que actúa sobre el medio físico: las emisiones contaminantes a la atmósfera, los vertidos a ríos y mares, la producción de residuos, entre otros males, conllevan a consecuencias sobre el medioambiente que deben contemplarse para minimizarlas. Estos efectos negativos del desarrollo económico se conocen desde hace años sin embargo, no ha sido hasta la década de los ochenta, cuando las sociedades y sus gobiernos, han empezado a reaccionar con la incorporación de medidas tendentes a lograr un equilibrio entre el medioambiente y los procesos derivados de la actuación humana, mediante la integración del factor medioambiental dentro de un sistema de gestión empresarial, que es considerado un aspecto de importancia decisiva y una auténtica ventaja competitiva frente a sus iguales (Rubio Calduch, 2001).

El medioambiente para Fernández Román (2017), ha sido considerado por casi todos los sectores empresariales como algo totalmente desligado de la realidad empresarial, una mera obligación legal y un coste inútil. Sin embargo, desde hace algún tiempo esta falsa percepción experimenta una evolución considerable, es cada vez más, un valor compartido por toda la sociedad y este hecho proyecta una notable presión sobre las empresas industriales y de otros sectores.

A medida que crece la preocupación por mejorar la gestión y calidad del medioambiente, las organizaciones de todo tipo y tamaño, fijan su atención en los impactos ambientales de sus actividades, productos y servicios, así como la repercusión en todas las partes interesadas, por lo que requiere del compromiso de la organización con un enfoque de control sistemático y de mejora continua de la gestión ambiental, cuyos resultados en el desempeño se evalúan a través de indicadores de carácter cuantitativo y cualitativo, los cuales son muy útiles ya que se podrían combinar características o cualidades significativas para obtener índices numéricos que constituyan una base útil para la toma de decisiones (Vilariño Corella, 2012).

En el sector empresarial cubano, destaca el caso de las empresas pertenecientes a la industria petrolera que, dada su actividad productiva, se consideran una amenaza potencial para el medioambiente, actividades como: la sísmica, la perforación de pozos, emisiones atmosféricas, efluentes líquidos y desechos sólidos y peligrosos. Se hace imprescindible la implementación de planes de manejo ambiental y de un sistema de gestión ambiental. Debido a la especial situación de estas empresas, es vital la revisión y evaluación constante del cumplimiento de los parámetros y datos medioambientales establecidos, con el objetivo de minimizar el impacto ambiental que ocasionan (Pérez Martínez, Cabrera Hernández & Rodríguez Blanco, 2016).

La Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas perteneciente al Ministerio de Energía y Minas, ubicada en la Bahía de Matanzas, es una de las entidades que ha avanzado de forma meritoria en la implementación de un sistema de gestión ambiental, aunque no cuenta con un procedimiento, ni instrumentos para cumplir de forma certera y sistemática la evaluación de esta actividad, lo que trae consigo que no sea posible identificar correctamente o establecer un seguimiento de las debilidades y deficiencias del trabajo ambiental realizado en la empresa para la protección del medioambiente, así como el establecimiento de un adecuado proceso de mejora continua de dicho trabajo.

Si bien la producción y el acceso a datos e información ambientales es creciente, existen deficiencias, tanto en la fiabilidad como en la cantidad de datos, y especialmente su armonización. La conversión, integración y adaptación de datos a la información es un proceso complejo. Las dificultades persisten porque todavía no hay

suficiente retroalimentación y validación durante el proceso que conecta a los recopiladores, con los verificadores y los usuarios finales. La falta de datos y la incierta fiabilidad de otros perjudican gravemente la evaluación ambiental integrada en los planos regional y mundial. La infraestructura de adquisición de datos y monitoreo de procesos en la mayor parte de los países en desarrollo tropieza con graves dificultades o no existe en absoluto debido a la limitación de recursos, personal y equipamiento. En consecuencia, se necesita definir un conjunto de indicadores ambientales prioritarios para su uso a nivel empresarial como base común para medir el avance en cuestiones ambientales y de desarrollo sustentable, integrados en un índice de gestión ambiental empresarial.

La situación presentada anteriormente evidencia una insuficiente gestión ambiental por parte de las empresas cubanas, provocada por la ausencia de mecanismos que permitan integrar los datos generados por los diferentes sectores en indicadores y en índices y el monitoreo integrado de esta actividad en apoyo a la toma de decisiones a nivel de gobierno local, lo que redundará en la persistencia de los problemas ambientales existentes en las empresas nacionales.

En consecuencia, se formula como **problema científico**: la insuficiente aplicación de herramientas de gestión y evaluación ambiental, que afectan la gestión ambiental empresarial.

En correspondencia con el problema científico planteado, se formula como **hipótesis general**: el desarrollo y aplicación de un instrumento metodológico para la evaluación de la gestión ambiental empresarial basado en índice sintético, contribuirá a la mejora de la gestión ambiental en las empresas cubanas.

Variable independiente: instrumento metodológico para la evaluación de la gestión ambiental empresarial basado en índice sintético.

Variable dependiente: mejora de la gestión ambiental en las empresas cubanas.

Estrategia de validación de la hipótesis:

Por las características propias del objeto de estudio y del desarrollo de la investigación, la estrategia trazada para comprobar la hipótesis general se basó en verificar si el instrumento metodológico desarrollado posee las cualidades que harían factible su aplicación racional al objeto de estudio práctico a partir de:

- Su consistencia lógica, desde el punto de vista estructural y funcional, mediante el uso de redes de Petri.
- Su adecuada concepción metodológica general, su factibilidad de implementación y, en particular, la pertinencia y utilidad de los instrumentos metodológicos elaborados, para ser aplicados en el objeto de estudio práctico seleccionado, así

como para obtener los beneficios esperados mediante la evaluación del Índice de ladov.

- La viabilidad de aplicación del instrumento metodológico, a través de un estudio de caso representativo, donde se aporte evidencia empírica que permita comprobar experimentalmente la hipótesis de investigación, a partir de la comprobación de la mejora de la gestión ambiental en las empresas cubanas, luego de la implementación de las soluciones propuestas.

Para dar solución al problema científico, se estableció el sistema de objetivos siguiente:

Objetivo General:

Desarrollar un instrumento metodológico para la evaluación de la gestión ambiental empresarial basado en índice sintético como contribución a la mejora de la gestión ambiental en las empresas cubanas.

Objetivos Específicos:

- Construir el marco teórico-referencial de la investigación sobre la base del análisis crítico de los fundamentos de la gestión ambiental empresarial y su evaluación mediante índices sintéticos.
- Diseñar un instrumento metodológico, compuesto por un modelo conceptual, un procedimiento general y sus específicos asociados, para la evaluación de la gestión ambiental empresarial.
- Implementar el instrumento metodológico para la evaluación de la gestión ambiental empresarial en una empresa de la provincia de Matanzas, Cuba.

El **objeto de estudio teórico** lo constituye la gestión ambiental empresarial, el **campo teórico** se centra en la evaluación de la gestión ambiental empresarial mediante índices sintéticos y como **objeto de estudio práctico** se seleccionó la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas.

La **novedad científica** de la presente tesis doctoral radica en la concepción de un instrumento metodológico para la gestión ambiental empresarial, basado en la construcción de un índice sintético mediante el empleo de técnicas de minería de datos. Asociado a lo anterior, se realizan los **aportes teórico-metodológicos** siguientes:

- La concepción de un instrumento metodológico para la gestión ambiental empresarial basado en la construcción y aplicación de un índice sintético mediante técnicas de minería de datos.

- La adecuación de procederes existentes al carácter multiempresarial del proceso, con la inclusión de índices sintéticos y la determinación de indicadores con la adecuación a la perspectiva ambiental.
- La validación del índice propuesto a partir de la simulación y no de criterios de expertos, lo que elimina en gran medida el factor de subjetividad.

Se obtienen como **principales resultados** de esta investigación, un instrumento metodológico que represente o caracterice el estado ambiental de la empresa objeto de estudio basado en un índice sintético; y se persigue un acercamiento y mejor aprovechamiento de los resultados de la investigación en el sistema empresarial, a través del desarrollo e implementación de herramientas basadas en sistemas de indicadores que ayuden a la medición, adquisición de datos y control de la gestión ambiental e integrada en pos de una mejora continua. Con lo que se logra, adicionalmente:

- Potenciar el desarrollo de la automatización de procesos tecnológicos en las empresas, a partir de un sistema de vigilancia temprana y evaluación compleja de indicadores ambientales, estrechamente vinculados a la innovación tecnológica, y en función de mejorar los modelos de gestión en zonas de interfase bahías-empresas.
- Diagnosticar la situación actual de la gestión ambiental y de su vínculo con la innovación tecnológica, así como del nivel actual de automatización, en las empresas de las zonas costeras de interfase asociadas a la Bahía de Matanzas.
- Mejorar el conjunto de indicadores ambientales establecidos para las empresas, en estrecho vínculo con la innovación tecnológica para empresas de interfase litoral-mar, o sea, ubicadas en la zona costera con respecto a la Bahía de Matanzas.
- Contribuir al logro de la conservación y utilización racional de los recursos naturales de la zona.
- Contribuir a la prevención y mitigación de desastres naturales (destrucción de ecosistemas frágiles), mediante la identificación de sus causas y la adopción de las medidas pertinentes para lograr dicho objetivo.
- Contribuir a cambios organizacionales positivos.
- Contribuir al establecimiento de prácticas de producción más limpia.

La evaluación de la gestión ambiental mediante el uso de los indicadores ambientales frutos de la aplicación de técnicas de minería de datos, brinda, entre otras opciones, la posibilidad de crear gráficos, procesamiento estadístico mediante modelos lineales y

no lineales, tests estadísticos y algoritmos de clasificación y agrupamiento, así como la realización de pronósticos de comportamiento.

Por otra parte, constituyen **valores de la investigación** los siguientes:

- **Valor práctico:** está determinado por la construcción de un procedimiento que permita evaluar la gestión ambiental empresarial que tribute a la toma de decisiones, permita el monitoreo y control de indicadores y facilite la realización de pronósticos y determinación de tendencias a partir de los datos históricos. La aplicación derivará en la reducción de la carga contaminante que generan las empresas, lo que deriva en la conservación in situ y ex situ de los recursos de la diversidad biológica, a partir de un manejo sostenible del ecosistema y con la aplicación de métodos de producción más limpia.
- **Valor social:** radica en la mejora funcional propiciada por la implementación del instrumento metodológico en las empresas, con la consiguiente elevación del nivel de satisfacción de la sociedad con respecto a los cambios en el entorno, basados en la conservación del medioambiente.
- **Valor económico:** se traduce en la responsabilidad de realizar acciones de mejoramiento y cuidado del ambiente físico y estético del territorio; así como el desarrollo de una gestión ecológicamente sustentable que disminuya los impactos causados sobre el medio natural provocado por el vertiginoso desarrollo económico, lo que equivale a ahorro por concepto de mitigación.

En el desarrollo de la investigación se utilizaron **métodos teóricos y empíricos** que integran instrumentos de diversa índole.

Dentro de los **métodos teóricos** empleados se encuentran: análisis y síntesis de la información, a partir de la revisión de la literatura especializada en los frentes temáticos abordados; análisis comparativo, lógico y sistémico; analogía, reflexión y otros procesos mentales inherentes a la investigación científica.

A su vez, los **métodos empíricos** están relacionados con: instrumentos de búsqueda de información científico-técnica y su ordenamiento (gestor bibliográfico EndNote®), la consulta a expertos (entrevistas y encuestas), análisis estadísticos mediante técnicas de minería de datos (software RStudio) y de inteligencia artificial (machine learning), que basadas en algoritmos buscan el aprendizaje dentro de grandes conjuntos de datos.

Para dar cumplimiento al diseño metodológico planteado, la presente investigación quedó estructurada de la forma siguiente:

- Introducción, donde se fundamenta la situación problemática, el problema científico, el sistema de objetivos, la hipótesis general de investigación y su

estrategia de comprobación, la novedad científica, los aportes realizados y los principales resultados obtenidos.

- Capítulo 1, en el que se analizan los referentes teórico-metodológicos relacionados con la gestión ambiental empresarial y su evaluación mediante índices sintéticos, así como la construcción de los mismos.
- Capítulo 2, donde se describe el modelo, el procedimiento general y los específicos asociados que conforman el instrumento metodológico propuesto, así como las herramientas de apoyo como propuesta de solución al problema científico planteado; y la validación teórica del procedimiento general mediante el empleo de redes de Petri y la técnica ladov..
- Capítulo 3, en el que se muestran los resultados de la implementación del procedimiento para la construcción del índice sintético de gestión ambiental empresarial y su validación mediante simulación y aplicación, como comprobación de la hipótesis general de investigación de acuerdo con la estrategia declarada.
- Conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación, la bibliografía consultada, así como un grupo de anexos de necesaria inclusión para una mejor comprensión de los resultados expuestos.

La investigación incluye el estudio de un total de 247 obras. El 42.5 % (105) pertenecen a los últimos 5 años; el 60.7 % (150) a los últimos diez años; y, el 30 % (74) se encuentra en idioma extranjero. Son referenciadas un total de 22 investigaciones doctorales (9%) y corresponden a trabajos del autor el 4.5 % (11).

CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE Y LA PRÁCTICA DE LA GESTIÓN AMBIENTAL EMPRESARIAL

Como resultado de análisis, consultas y estudios realizados durante el desarrollo de la presente investigación, se plantea el hilo conductor y la estructura del marco teórico referencial, a partir del problema científico a resolver y sintetizado en la introducción de este documento. En el hilo conductor (Figura 1.1) para construir el marco teórico–referencial de la investigación, se consideran aspectos tales como:

- La gestión ambiental y la gestión ambiental empresarial: conceptualización y contextualización en Cuba.
- Control de gestión, con énfasis en indicadores e índices sintéticos y su aplicación en la gestión ambiental.
- Métodos y procedimientos para la construcción de índices sintéticos. Construcción de índices sintéticos mediante técnicas de minería de datos.

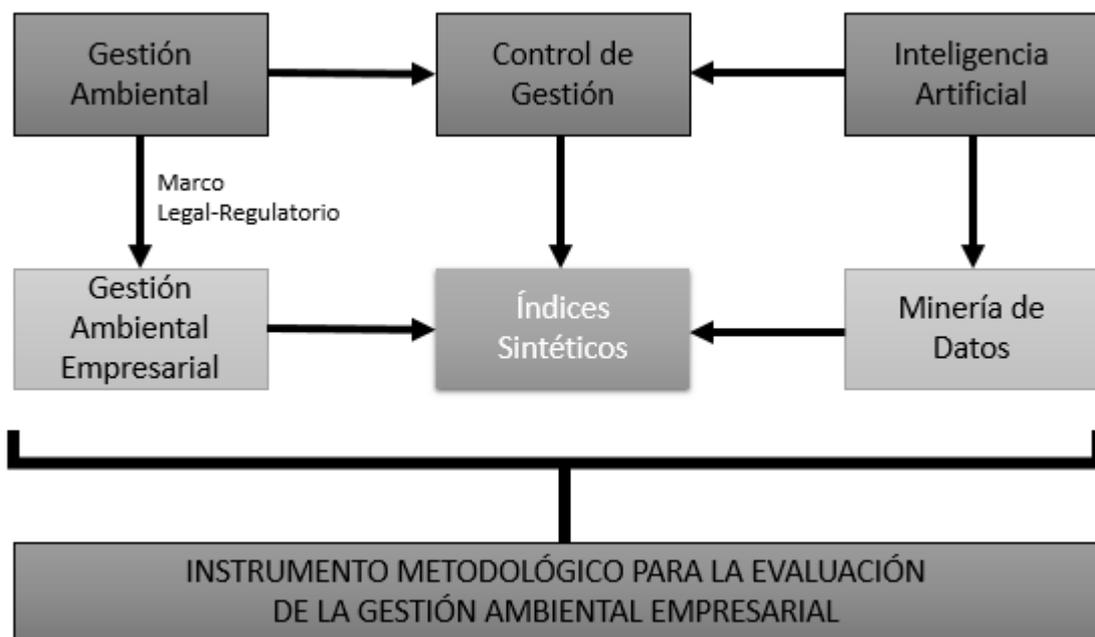


Figura 1.1. Hilo conductor del marco teórico referencial de la investigación.

Fuente: elaboración propia.

1.1. La gestión ambiental en el contexto empresarial

Para Acosta (2017) el concepto de empresa revela un trasfondo filosófico que permite conocer la importancia que tienen las personas y sus conversaciones en el funcionamiento de toda empresa, además de las actividades que se realizan y los recursos que se utilizan. La empresa es una organización social que realiza un conjunto de actividades y utiliza una gran variedad de recursos (financieros, materiales, tecnológicos y humanos) para lograr determinados objetivos, como la satisfacción de una necesidad o deseo de su mercado meta con la finalidad de lucrar o

no; y que es construida a partir de conversaciones específicas basadas en compromisos mutuos entre las personas que la conforman.

En el desarrollo normal de sus actividades, las empresas se ven influenciadas por condiciones de rigor extremo, determinadas por variaciones internas y externas, estas últimas, provenientes del entorno y normalmente fuera de control. Estos acontecimientos crean la necesidad de una gestión integral en las organizaciones, que permita establecer la mejor manera de afrontar los problemas, con la consecuente disminución gradual de la improvisación y el riesgo en la toma de decisiones. En este contexto, la política ambiental de país desempeña un papel determinante.

De acuerdo con (Roffe, 1997), la interacción empresa - medioambiente ha evolucionado al entorno en que la empresa se desarrolla e interrelaciona. Este entorno se ha transformado de condiciones estables y con reglas fijas, que funciona como un sistema cerrado, a otro turbulento y muy competitivo que funciona como un sistema abierto. La empresa influye en el medio para proporcionar productos y servicios de calidad para la mejora de la calidad de vida, genera bienes y servicios, empleo, ganancias, pero también consume recursos naturales escasos y genera contaminación y residuos. Los efectos que la empresa genera en su entorno han de clasificarse según su carácter económico, social y medioambiental, con una necesaria visión más amplia de la definición de empresa como sistema abierto.

No existe un mercado específico para el medioambiente, pues son bienes públicos, sin precio asignado, pero las acciones para mantenerlo sin contaminar sí lo tienen; el hecho es que la sociedad está, en la práctica, asignándole un valor implícito a muchos de estos bienes desde el mismo momento en que se adoptan decisiones con impacto sobre el medioambiente (Roffe, 1997).

Son numerosas las buenas prácticas que se han diseñado e introducido en los últimos años en el mundo empresarial (Castro Torres, A. S. & Suysuy Chambergo, E. J., 2020), y entre ellas pueden mencionarse: ecoeficiencia de procesos, producción más limpia (P+L), reconversión tecnológica, aprovechamiento de residuos como materia prima para otros procesos productivos, ahorros de energía, prevención de la contaminación, gestión del riesgo, calibración y mantenimiento periódico, entre otras. A lo anterior se añade el monitoreo y la medición regular conforme con la legislación y las regulaciones ambientales pertinentes.

El proceso revolucionario cubano se ha caracterizado, desde tiempos tempranos, por apoyar la constante y creciente ola de acciones y medidas implementadas desde el año 1992, en el que fueron planteados en la Cumbre de la Tierra los problemas medioambientales que se sucedían en el planeta. En Cuba, la conservación del medioambiente y la protección de los recursos naturales se realiza sobre bases

científicas, se elaboran y aplican normas técnicas que contemplan la dimensión ambiental, se crean las bases para desarrollar los Sistemas de Gestión Ambiental Empresarial desde el diseño de procedimientos basados en las normas internacionales ISO 14000, se desarrollan una serie de acciones para introducir y comprometer a las empresas en el concepto de P+L, se capacitan a los gestores ambientales e incentiva a los empresarios a que incorporen el componente ambiental como un elemento de competitividad en sus actividades económicas.

Muchos son los momentos claves que marcan la evolución y aceptación del vínculo empresa-medioambiente en Cuba, algunos de ellos son: participación de Cuba en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD), conocida como la Cumbre de Río en 1992, la creación del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (Citma) en 1994, la actualización de la Estrategia Ambiental Nacional cuyos objetivos yacen principalmente en indicar las vías más idóneas para preservar y desarrollar los logros ambientales alcanzados por la Revolución e identificar los principales problemas ambientales del país. A estos elementos es necesario añadirle los documentos con que cuenta el país para la integración de los conceptos en análisis, ellos son: las Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA), las auditorías ambientales; así como, la inspección ambiental, con una visión más integral que las auditorías ambientales.

El estado cubano siempre ha sentido la responsabilidad de hacer suyo el cuidado del medioambiente y ha empleado disímiles recursos y esfuerzos para llevar a cabo esta actividad. Aunque existen sectores, especialmente el empresarial, que aún enfocan su atención en alcanzar altos niveles de producción y pasan por alto el impacto que tienen sus actividades sobre medioambiente. Por lo anterior, el Citma emitió en 2002 la Resolución No.111 que establece el Sistema Nacional de Monitoreo Ambiental cuyo objetivo es valorar el estado del medioambiente para contribuir a la toma de decisiones sobre la protección ambiental y el uso sostenible de los recursos naturales, a través de la realización del monitoreo ambiental.

1.1.1. Gestión ambiental. Generalidades

El medioambiente sufre las consecuencias del desarrollo tecnológico de la sociedad (Lara Galindo, Flores Domínguez & Zulaica, 2018). Cada día, el nivel de contaminación aumenta (Perera Conde *et al.*, 2021) y los esfuerzos para la disminución de estos nefastos efectos son insuficientes para asegurar un futuro que permita la supervivencia de las especies que habitan el planeta, incluido el propio ser humano (Briggs *et al.*, 2012).

La gestión forma parte de la estrategia formulada por los ideólogos del desarrollo. La sostenibilidad y sustentabilidad (Ávila Zarta, 2018) han surgido como conceptos en

distintas disciplinas naturales, técnicas o sociales, con el fin precisamente de plantear la relación existente entre lo socioeconómico y tecnológico con las leyes de la naturaleza. Desde esta perspectiva surge la gestión ambiental en el contexto del desarrollo sostenible o sustentable (Reyes Chapman, 2019).

En la década de los ochenta, las sociedades y sus gobiernos incorporan una serie de medidas tendentes a un entendimiento equilibrado entre el medioambiente y los procesos, derivadas de la actuación humana (Ilasaca Cahuata *et al.*, 2018), con la integración del factor medioambiental dentro de un Sistema de Gestión Empresarial (Herrera, E. A. & Rodríguez, J. M., 2019).

Desde una óptica empresarial, la normatividad de estandarización universal ISO, puesta en marcha en 1996 con el nombre de Norma ISO 14001, definió el Sistema de Gestión Medio Ambiental de una organización (SGMA, según siglas utilizadas en español) como “la parte del sistema general de gestión que incluye la estructura organizativa, la planificación de las actividades, las responsabilidades, las prácticas, los procedimientos, los procesos y los recursos para desarrollar, implantar, llevar a efecto, revisar y mantener al día la política ambiental” (Reyes Chapman, 2019).

En su concepción más amplia, la gestión ambiental es un proceso permanente y de aproximaciones sucesivas en el cual diversos actores públicos y privados y de la sociedad civil desarrollan un conjunto de esfuerzos específicos con el propósito de preservar, restaurar, conservar y utilizar de manera sustentable el medioambiente (Rodríguez Becerra *et al.*, 2002).

Diversas son las definiciones de gestión ambiental planteadas por los autores especialistas en el tema, la mayoría coincide en que es el conjunto de acciones emprendidas por la sociedad, o parte de ella, con el fin de proteger el medioambiente (Anexo 1.1). Cabe destacar, que no se aprecia en las definiciones analizadas, un enfoque que enfatice la necesidad de profundización, en cuanto: a componentes principales y variables, para lograr una concepción más pertinente, actual e integral.

En la presente investigación se asume como gestión ambiental al conjunto de acciones, directrices, lineamientos, políticas y estrategias emprendidas por el Estado, y la sociedad en su conjunto, para alcanzar el aprovechamiento óptimo de los recursos naturales y minimizar los impactos negativos sobre el medioambiente, en aras del desarrollo sostenible.

Las principales funciones de la gestión ambiental son: mantener y mejorar la calidad ambiental, suministrar servicios ambientales, y conservar, mantener y enriquecer los recursos naturales y los ecosistemas (Espinoza, 2002).

La gestión ambiental, por lo tanto, puede ser abordada a distintos niveles de gobierno, o de grupos del sector privado, o en diversos ámbitos territoriales (global, regional,

subregional, nivel metropolitano, ciudades, barrios, poblados, cuencas hidrográficas, etc.) (Rodríguez Becerra *et al.*, 2002).

La gestión ambiental requiere de enfoques para su concepción teórica y práctica, se destacan los enfoques: holístico, de proceso, estratégico y de mejora continua, impulsados por el modelo ISO 14001: 2004.

Una gestión ambiental adecuada (Rivas Marín, 2011) implica la articulación de intereses, expectativas y conflictos en materias ambientales, en distintos ámbitos territoriales y sectoriales, basada en procesos participativos permanentes y efectivos. Requiere de un conjunto de instrumentos y medios que contribuyan a la aplicación efectiva de la política ambiental y legislación ambiental. Dichos instrumentos pueden ser tanto de comando y control, como también económicos, de autogestión y regulación, de planeación territorial, entre otros. Los medios necesarios son, la educación y capacitación, la ciencia y tecnología, la información y comunicación, y el financiamiento.

Los actores de la gestión ambiental son aquellos grupos de la sociedad que identifican la problemática del medioambiente, y que formulan e implementan políticas dirigidas a su protección. Se consideran actores claves de la gestión ambiental a las organizaciones gubernamentales, los grupos organizados de la sociedad civil, los medios de comunicación masiva y las empresas del sector privado que se han organizado en pro de la protección ambiental (Rodríguez Becerra *et al.*, 2002).

La gestión ambiental que se implementa, dentro de las empresas, se denomina Sistema de Gestión Ambiental (SGA) (Reyes Chapman, 2019). El cual es un conjunto de procesos y prácticas que permiten a una empresa reducir sus impactos ambientales, aumentar su eficiencia operativa y mejorar su imagen. En este sentido, la presente investigación pretende desarrollar un instrumento metodológico que permita la evaluación de la gestión ambiental en el contexto empresarial.

1.1.2. Gestión ambiental empresarial

La conservación del medioambiente (Pérez García, 2013) como una función del Estado, lo habilita y lo obliga, al mismo tiempo, a intervenir en sus distintos niveles de gobierno en la gestión ambiental, más aún cuando hay la percepción de que el ambiente es un bien colectivo.

La gestión ambiental estatal en los países de la región de América Latina y el Caribe se rige por un marco jurídico y de empresas públicas cuya responsabilidad ha sido diseñar e implementar planes y programas ambientales. Este fundamento legal y empresarial formaliza la gestión ambiental hacia dentro de los países, a través de la consagración constitucional, la creación de normatividad ambiental, la asignación de funciones ambientales a diversas agencias públicas, la creación de procedimientos

ambientales en sectores públicos, la adhesión a tratados multilaterales, y la creación de sistemas de gestión ambiental a cargo de autoridades con responsabilidades ambientales explícitas (Rodríguez Becerra *et al.*, 2002).

La institucionalidad ambiental (Guiloff, 2011) en la región conduce a la creación y adopción de políticas ambientales, con expresiones a nivel nacional, regional y local, y con coberturas y alcances distintos. Una parte de las políticas fundamentales se encuentran contenidas en la Constitución, en las leyes y en el conjunto de instrumentos que las desarrollan (decretos, resoluciones, reglamentaciones). La institucionalidad ambiental implementada a través de las Políticas Ambientales y el Sistema de Gestión Ambiental pone de relieve la responsabilidad ante el medioambiente y hace explícito que la participación de la comunidad es vital a la hora de la elaboración de las normas de calidad ambiental (Vallejos Romero, 2005).

En el ámbito del marco empresarial necesario para hacer efectivas las políticas ambientales en los diferentes niveles, es importante el principio de transectorialización. Si bien en Cuba, como en la mayoría de los países del hemisferio, existe un organismo cuya misión es la protección del medioambiente y la dirección de la política ambiental del país, dicha labor no puede ser exclusiva del mismo, sino que en ella han de comprometerse todos los organismos y empresas del Estado en una labor coordinada, de forma que en cada plan de desarrollo y dentro de las respectivas competencias de cada uno, se inserte la dimensión ambiental. En el ordenamiento jurídico cubano se refleja este principio pues la gestión ambiental es integral y transectorial y en ella participan, de modo coordinado, los órganos y organismos estatales, otras entidades y empresas, la sociedad y los ciudadanos en general, de acuerdo con sus respectivas competencias y capacidades (Antúnez Sánchez, 2019).

Las empresas se han caracterizado por la generación excesiva de residuos y por la contaminación del aire, el agua y el suelo. A ello se suma la demanda elevada de recursos naturales, altos consumos de energía y de insumos, de los cuales muchos son tóxicos, dañinos al medioambiente y a la salud humana, así como la creación de escenarios de riesgos de accidentes y desastres. Todo lo anterior hace que la actividad empresarial sea la que más impactos negativos causa al medioambiente, debido fundamentalmente a procesos de producción y servicios ineficientes, por las tecnologías y materias primas empleadas y los gastos de energía requeridos, lo que afecta la productividad, eficiencia y competitividad de las mismas.

Son las instituciones, organizaciones y empresas, con la participación ciudadana y de todos en general, las células que operan el funcionamiento ambiental. Es por esta razón que, en la actualidad, la política ambiental del país hace especial énfasis en la gestión ambiental a nivel de la actividad organizacional y estimula la creación de los

mecanismos que contribuyan a elevar el nivel de conocimiento ambiental de la población en general. Es una exigencia para el perfeccionamiento empresarial, la incorporación de la dimensión ambiental al quehacer cotidiano de las organizaciones.

La gestión ambiental empresarial tiene como objetivo la prevención de la contaminación, el uso más eficiente de las materias primas, insumos y energía; el incremento de la eficiencia económica y la formación de una cultura ambiental. Además, constituye una herramienta para reducir los riesgos operacionales (Ramírez *et al.*, 2016).

La gestión ambiental en las empresas debe enfocarse, según González, & Bermúdez (2011), como la exigencia que adquiere mayor relevancia para la supervivencia de las empresas. Esta gestión debe concentrarse en una planificación que involucre el establecimiento de normas, medidas preventivas e indicadores que puedan medir el control; para que las empresas reduzcan su carga contaminante y obtengan beneficios en la medida que minimicen el impacto ambiental de sus actividades.

Se aprecia la importancia de la gestión ambiental como factor fundamental para las empresas y su acometer en el éxito de los retos del presente siglo XXI. Es alentadora la situación actual de las tareas ambientales desarrolladas, con énfasis en la gestión protegida de elementos socioeconómicos a partir de la innovación tecnológica e investigaciones científicas. Se precisa de conciencia ambiental y de un marco legal regulatorio que permita realizar las actividades en función de la calidad y gestión ambiental.

El análisis de la literatura nacional e internacional referida a las metodologías o procedimientos para la evaluación de la gestión ambiental devela la existencia de numerosos modelos, instrumentos, metodologías y procedimientos para la evaluación de la gestión ambiental; algunos generales, otros específicos para situaciones concretas; abordan aspectos tanto cualitativos, como cuantitativos.

Procederes, metodologías, modelos e instrumentos para la evaluación de la gestión ambiental empresarial

Existen grandes diferencias en los enfoques, perspectivas teóricas, metodologías, técnicas y recursos empleados en los estudios acerca de la evaluación de la gestión ambiental empresarial. Evidentes en investigaciones recientes: procedimiento evaluativo para unidades de gestión ambiental (Mantecón Licea, Feria Ávila, & Mateo Rodríguez, 2017), metodología para evaluación de la condición ambiental en microcuencas urbanas (Guarín Villamizar, 2017), modelo para dinamizar la gestión ambiental en cuencas con enfoque socialmente responsable (Arteta Peña, Moreno Pino & Steffanell De León, 2017), instrumento de participación ciudadana en la elaboración de indicadores para la evaluación de la gestión ambiental sostenible

(Márquez Escárcega, 2017), modelo de responsabilidad ambiental empresarial aplicado a cadenas productivas (de Castro Alcântara, et al., 2017), análisis de unidades de paisaje y evaluación de impacto ambiental como herramientas para la gestión ambiental municipal. Caso de aplicación: municipio de Tona, España (Rivera Pabón & Senna, 2017), modelo de simulación dinámica para evaluar el impacto ambiental de la producción y logística inversa de las llantas (Camargo Rodríguez et al., 2017), modelo de mejora ambiental para la producción más limpia de cobre, y su influencia en la gestión empresarial con ecuaciones estructurales (Ortecho, 2018), procedimiento sancionatorio ambiental: análisis de una metodología que sigue en construcción (Maya, 2018), metodología para evaluación de impacto ambiental de proyectos de infraestructura en Colombia (Viloria Villegas, Cadavid & Awad, 2018), procedimiento sobre gestión ambiental para el Centro de Información y Gestión Tecnológica (Reyes Chapman & Ochoa Ávila, 2019), metodología para la realización de un diagnóstico de la gestión de indicadores ambientales en la administración pública (Miranda Cuéllar et al., 2019), y computación con palabras en la evaluación del diseño como instrumento de la gestión ambiental (Renté Labrada et al., 2021); con especial énfasis en la inequidad de la calidad y cantidad de información manejada en los informes.

Numerosos métodos han sido utilizados en la evaluación de la gestión ambiental. Los métodos más usados tienden a ser sencillos, incluyen listas de verificación, opiniones de expertos (dictámenes profesionales), listas de chequeo enfocadas a decisiones: análisis ambiental coste-beneficio, matrices de interacción, modelización cualitativa y la modelización cuantitativa. Los diferentes métodos pueden no tener aplicabilidad uniforme en todos los países debido a diferencias en sus legislaciones, marcos de procedimiento, estándares ambientales y programas de administración ambiental. En la literatura consultada no se aprecia el empleo de técnicas de minería de datos como método para la construcción de índices sintéticos para la evaluación de la gestión ambiental.

1.1.3. Marco legal regulatorio de la gestión ambiental empresarial

En 1992 surge la primera idea de sistemas de gestión medioambiental, formalizados por la British Standard Institution en la norma BS 7750, Specification for Environmental Management Systems, en consideración con los conceptos de gestión de calidad definidos en la serie de normas ISO 9000, que permiten la Certificación de Sistemas de Gestión Medioambiental en procesos productivos y plantas industriales, así como en las actividades del sector servicios. Inspiradas en esta iniciativa, nacen con posterioridad distintas normas a nivel nacional e internacional. Finalmente, en septiembre de 1996, se publica la Norma Internacional ISO 14001, Sistemas de

Gestión Medioambiental Requisitos y guía de utilización, con el fin de crear el marco que regule la certificación de los sistemas de gestión medioambiental a nivel internacional, y evitar las diferencias que pudieran surgir de la aplicación de dichas normas en los diferentes países (Rey, 2008).

La primera ley marco ambiental cubana, aunque no con ese nombre, fue la Ley 33/1981, de protección del medioambiente y del uso racional de los recursos naturales. Utiliza un concepto más amplio de medioambiente, al exponer que es el sistema de elementos bióticos, abióticos y socioeconómicos, con los que interactúa el hombre, a la vez que se adapta al mismo, lo transforma y lo utiliza para satisfacer sus necesidades, que pueden ser económicas, sociales o culturales (Antúnez Sánchez, 2019).

Bajo el amparo de esta Ley, se promulgó el Decreto Ley 67/1983, que le asigna a la Academia de Ciencias de Cuba la función de dirigir el Sistema Nacional de Protección del medioambiente y del uso racional de los recursos naturales.

El 11 de julio de 1997, ya producido el proceso de reforma constitucional en 1992 y creado el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, en 1994, se promulga la Ley 81, del medioambiente. Desarrolla los instrumentos de la política y la gestión ambiental, esferas específicas de protección del medioambiente, recursos energéticos, normas relativas a la agricultura sostenible, desarrollo sostenible del turismo, preservación del patrimonio cultural asociado al entorno natural, entre otros. Es derogada la Ley 33, como consecuencia del vuelco internacional ocurrido en materia de medioambiente, de los cuales Cuba era parte de ellos, así como en respuesta a los cambios económicos, sociales y empresariales que se generaron en el país. A esto se agrega la elevación del nivel de información en materia de medioambiente que adquirieron diversas instituciones científicas del país. Esta ley define los instrumentos de la política y la gestión ambiental en Cuba, entre los cuales, la Estrategia Ambiental juega un rol fundamental en la vía del desarrollo.

Así, de forma paulatina, surgen los distintos cuerpos legales sobre protección del entorno, a modo de leyes-marco, contentivas de los preceptos fundamentales sobre la materia. En este proceso se contó con la asesoría de la Oficina para Latinoamérica y el Caribe del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), que colaboró en la capacitación de los recursos humanos necesarios para asumir esa tarea, la celebración de talleres, la recopilación de información bibliográfica y legislativa de los países de la región, así como en la estructuración de una plataforma para la enseñanza del Derecho Ambiental en la región.

El Derecho Ambiental cubano no se reduce, evidentemente, a la Ley de Medio Ambiente. La legislación complementaria resulta necesaria debido al nivel de detalle

que implica la regulación de determinados recursos naturales o procesos, lo que haría sumamente difícil la codificación en esta materia. La legislación complementaria adquiere características especiales, pues varias de estas disposiciones son anteriores a la propia ley marco y, por lo tanto, no tienen incorporados sus principios inspiradores.

En primer lugar, debe citarse la Ley Forestal, Ley 85/1998, que ostenta el mismo rango que la ley marco ambiental. En el orden empresarial, la ley realiza una diferenciación entre las funciones correspondientes al Ministerio de Agricultura, con carácter rector, al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, del Ministerio del Interior, que dirige el Cuerpo de Guardabosques, así como la actividad de la lucha contra incendios. Contiene la ley un capítulo VIII dedicado a sanciones administrativas, responsabilidad civil y penal por daños al patrimonio forestal (Baquero Valiente, 2019). Con rango de Decreto Ley, producto de la actividad legislativa del Consejo de Estado, existen varios cuerpos normativos, de importancia trascendental. El Decreto Ley 200, de 22 de diciembre de 1999, sobre contravenciones en materia de Medioambiente, que agrupa contravenciones según la esfera de protección, como las relacionadas con el proceso de evaluación de impacto ambiental, áreas protegidas, desastres naturales, ruidos y vibraciones, atmósfera, desechos peligrosos, etc. En cuanto a las sanciones aplicables, se encuentran en el Artículo Cuatro del Decreto Ley, además de la multa, la amonestación, prestación comunitaria consistente en actividad relacionada con el ambiente; obligación de hacer que se traduce en el cese de la actividad infractora; prohibición de efectuar determinadas actividades; comiso de los efectos utilizados para cometer la contravención; suspensión temporal de la actividad o de las licencias y permisos correspondientes, así como la clausura definitiva del establecimiento.

También se sitúa el Decreto Ley 201/1999, del Sistema Nacional de Áreas Protegidas. El cual establece diferentes categorías de manejo, regula la propuesta y declaración de las áreas protegidas, y sus planes de manejo, y establece el uso público en las áreas protegidas, como regla general, con independencia de la zonificación que se realice al interior de las mismas. Dicha normativa debe ser leída hoy a la luz del Decreto Ley 331/2015, sobre zonas con regulaciones especiales, entre las que incluye las de alta significación ambiental e histórico cultural, de desarrollo económico y de interés para la defensa y la seguridad.

A este propio nivel, se sitúa el Decreto Ley 212/2000, de gestión de la zona costera. Este define la zona costera y su zona de protección, establece sus límites según el tipo de costa, regula el uso de la misma, las instalaciones permitidas y las correspondientes prohibiciones, entre otros aspectos.

En el 2004, el Citma de Cuba estableció una metodología para el Reconocimiento Ambiental Nacional, mediante la Resolución 135/2004, la misma plantea entre sus objetivos fundamentales, incentivar la mejora continua del desempeño productivo y ambiental de las entidades involucradas, así como la solución de los principales problemas ambientales que estas generan, así como promover el cumplimiento de la legislación ambiental y las normas técnicas vigentes (Reyes Chapman, 2019).

Con rango de resolución ministerial se encuentran la Resolución 103/2008 Reglamento de la Inspección Ambiental Estatal, del Citma; la Resolución 132/2009 Reglamento del proceso de evaluación de impacto ambiental, del propio organismo; así como la Resolución 160/2011, Regulaciones para el control y la protección de especies de especial significación para la diversidad biológica en el país, entre las más significativas.

En correspondencia con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de la Asamblea General de las Naciones Unidas, el Citma ha elaborado documentos rectores para regir la Política Ambiental Nacional y su interrelación con otros ámbitos económicos y sociales, además de la Ley 81 de Medio Ambiente, el Programa Nacional de Medio Ambiente y Desarrollo, la Estrategia Ambiental Nacional y el Plan de Estado para el enfrentamiento al cambio climático “Tarea Vida”. Particularmente en la Estrategia Ambiental Nacional y Provincial, son identificados instrumentos esenciales del trabajo en materia ambiental. Anteriormente, en el año 2007, se aprobó un sistema de gestión mediante el Decreto Ley No. 281 Reglamento para la implantación y consolidación del Sistema de Dirección y gestión Empresarial Estatal, en el cual se define al Sistema de Gestión Ambiental Empresarial.

La metodología universalmente más conocida y aplicada en materia de gestión ambiental es la ISO 14001:2004, actualizada en el año 2015 y adaptada y establecida como Norma Cubana, en ella se establecen etapas para la gestión ambiental, ellas son: política ambiental, planificación, implantación y operación, verificación y revisión por la dirección (Reyes Chapman, 2019).

El marco legal regulatorio para la gestión ambiental empresarial existente en el país, se basa en un conjunto de instrumentos que norman y regulan el actuar, a la vez que establecen las pautas para este tipo de gestión mediante estrategias y metodologías. Dichas estrategias y metodologías establecen un conjunto de indicadores que permiten evaluar a las empresas según el desempeño en la gestión ambiental.

1.2. Control de gestión: índices sintéticos

La existencia de un adecuado sistema de control de gestión (Medina León *et al.*, 2011) es uno de los pilares que requiere cualquier empresa para conocer su comportamiento y alcanzar el éxito a largo plazo, de acuerdo con la planificación establecida y el

cumplimiento de los objetivos trazados (Comas Rodríguez et al., 2015, Medina León et al., 2014).

En el entorno actual, con los cambios constantes es necesario que el control de gestión evolucione hacia una concepción proactiva (Nogueira Rivera, 2002) y que conjugue los aspectos internos y externos de la organización, de modo que permita la mejora en la toma de decisiones (Tundidor Montes de Oca et al., 2018). Dentro del control de gestión se destacan dos herramientas de amplia aplicación: el Cuadro de Mando Integral (CMI) y la gestión por procesos (Comas Rodríguez et al., 2015).

El CMI ha pasado, de ser un conjunto de indicadores que proporcionan a la alta dirección una visión comprensiva del negocio, a convertirse en una herramienta de gestión que traduce la estrategia de la empresa en un conjunto coherente de indicadores (Medina León et al., 2010).

La gestión por procesos supera la organización jerárquica tradicional, donde cada integrante se relaciona con su departamento funcional, para introducir una nueva organización orientada al cliente final a través del conocimiento, control y mejora de los procesos internos (Comas Rodríguez, 2013)

En el presente siglo, se ha reconocido la necesidad de emplear un enfoque de gestión sistémico que, introducido mediante diferentes mecanismos, integre en un todo coherente a las empresas con responsabilidad directa o indirecta en la gestión ambiental y sus políticas.

Implementar la gestión por procesos en la empresa se ha convertido en una necesidad para responder a los requerimientos del cliente interno y externo (Higuera Gutiérrez & Rugeles Ferreira, 2019). Para lograrlo es imprescindible optimizar el sistema de procesos (eliminar errores y aumentar la eficacia y la eficiencia por conceptos de reducción de tiempos) vinculado directamente a su objeto social, lograr el reconocimiento de la organización como un todo, obtener beneficios con la aplicación consecuente de la gestión por procesos, tales como: incrementar el nivel de coherencia del sistema para alcanzar los objetivos planificados, y asegurar que cada uno de los sistemas de gestión que la componen no sea más importante que el otro y todos por igual funcionen con integración (Llanes Font & Lorenzo Llanes, 2017).

Las señales que se utilizan para monitorear la gestión por procesos son conocidas como indicadores de gestión, que constituyen una expresión cuantitativa del comportamiento y desempeño de un proceso, cuya magnitud señala una desviación sobre la cual se toman acciones correctivas o preventivas según el caso (Zabala Jaramillo, 1992).

Los indicadores de aplicación y cumplimiento de la normativa ambiental, llamados de desempeño de la gestión ambiental, permiten dar seguimiento y monitoreo a las

normas ambientales vinculadas al estado de recursos y regulaciones de la actividad productiva (Emaides, A., Salerno, M. L. & Paredes, M. D., 2018).

1.2.1. Indicadores e índices sintéticos

La información oportuna, precisa y fiable acerca del medioambiente y el desarrollo sustentable constituye una herramienta requerida por los decisores. Los indicadores poseen el potencial de constituir importantes herramientas en la comunicación de la información científica y técnica. Igualmente, pueden facilitar el acceso a dicha información a los diferentes grupos de usuarios, y así transformar la información en acción. De este modo, el desarrollo de herramientas accesibles a los usuarios no expertos, así como, la utilización de marcos de indicadores comunes, pueden facilitar no sólo la transformación de datos en información relevante, sino también la formulación de estrategias para la planificación y la formulación de políticas (Pérez Martínez, Cabrera Hernández & Berrio Turiño, 2019-b).

Así, los indicadores sirven para la identificación de aquellas fuerzas que contribuyen hacia el mejoramiento o la degradación de las condiciones económicas, sociales y ambientales, que permiten establecer metas precisas para acciones futuras, para que, a su vez, los gobiernos y la sociedad civil evalúen avances en sus acciones.

Los índices sintéticos o integrales han sido utilizados en una gran variedad de disciplinas para medir conceptos complejos y multidimensionales que, en algunos casos no se pueden observar ni medir directamente, o en otros, para facilitar la toma de decisiones. El poder de estos indicadores reside en su habilidad de sintetizar una gran cantidad de información en un formato simple y práctico. La sencillez de estos índices sintéticos facilita el acceso a la información al público en general y a otros usuarios potenciales. Los indicadores son instrumentos de medición analítica más utilizados en la práctica en multitud de campos de la realidad social (Al Mamun & Lownes, 2011; Lara Galindo, Flores Domínguez, & Zulaica, 2018), por lo que contribuyen a la toma de decisiones (López Palomeque *et al.*, 2018) y a la mejora continua de la institución (Villacreses Cajamarca, 2019).

Se emplean para comparar los datos planificados y el comportamiento real alcanzado para las diferentes actividades de una organización en un tiempo determinado (Valle Barra, 2005). Los valores reales de los indicadores permiten conocer el grado de cumplimiento de los objetivos, así como controlar y trazar estrategias. Son instrumentos que expresan un resultado cuantificable, y constituyen una herramienta para dirigir y gestionar una organización, de forma general o por dimensiones, al facilitar la medición de su avance.

Entre las ventajas del empleo de indicadores en el control de gestión identificadas en (Hernández Nariño, 2010; Medina León *et al.*, 2014) destacan:

- ofrecen como resultado un único valor que facilita la comparación con períodos precedentes, otras organizaciones o a través de tendencias;
- contribuyen a la toma de decisiones al hacerla más ágil y centrada en inductores clave;
- permiten ser automatizados fácilmente;
- resulta factible crear relaciones causa – efecto; y
- permiten un diagnóstico permanente del sistema, y vincularse a procedimientos de mejora.

Sin embargo, el listado de indicadores a medir en una empresa puede tornarse realmente grande y engorroso para sus directivos, lo cual ha llevado a los investigadores a reducirlo a un número más manejable mediante el uso de índices sintéticos que permitan un mayor control y una toma de decisiones más efectiva.

Los índices sintéticos se pueden definir como instrumentos que capturan, en una sola medida, un concepto multidimensional que, *a priori*, solo puede ser representado mediante un conjunto de indicadores individuales. Además, debe cumplir los requisitos de sostenibilidad, oportunidad, periodicidad, comprensibilidad, compatibilidad, eficiencia, utilidad, fiabilidad, precisión y relevancia (Campos Freire & Valencia Bermúdez, 2016). La confección de índices sintéticos responde a la necesidad de medir fenómenos complejos, no directamente observables por variables individuales ya existentes.

Un informe de la Comisión Europea apunta dos notas definitorias para un índice sintético. Se trata de un indicador construido a partir de otros que no tienen una unidad de medida común, y para los que no existe una forma obvia de ponderarlos (Saisana & Tarantola, 2002). Aunque son varios y complejos los pasos que deben darse en la construcción de un indicador de este tipo (Freudenberg, 2003), la propia definición identifica uno de los más problemáticos: la ponderación de los indicadores parciales que constituyen el índice. Sobre la complejidad de esta cuestión puede consultarse (Cox *et al.*, 1992).

De acuerdo con el glosario de términos estadísticos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), los índices sintéticos son la combinación o agregación matemática de los indicadores que representan los distintos componentes del concepto que se pretende evaluar a partir de un sistema de partida, derivado en una evaluación multidimensional del mismo. Mientras los indicadores hacen referencia a estadísticas no muy elaboradas, la información que se infiere de éstos es muy limitada (indicadores simples) (Madrigal Delgado *et al.*, 2018).

En concordancia con Ossa Giraldo (2014), el objetivo metodológico es sintetizar el conjunto de aspectos en uno integral, el cual se denomina índice sintético.

Los índices para las evaluaciones han cobrado importancia, sobre todo porque permiten combinar varios indicadores o variables en un sistema de ponderación que jerarquiza sus componentes; lo cual admite, entre otras cosas, sintetizar en un solo índice los resultados de una serie de componentes y posibilita una categorización de los resultados más sencilla (Santos Pérez, 2020).

Los indicadores permiten evaluar de forma cuantitativa la eficacia y/o eficiencia de los procesos, pueden medir la percepción del cliente acerca de los resultados (indicadores de percepción) o bien variables intrínsecas del proceso (indicadores de rendimiento). Es recomendable, por tanto, que la empresa establezca indicadores de rendimiento y/o percepción al menos de sus procesos estratégicos y claves (Peteiro de Bureau Veritas, 2010).

Los indicadores son necesarios para poder mejorar. Lo que no se mide no se puede controlar y lo que no se controla no se puede gestionar. Son necesarios para la supervisión, control y para la toma de decisiones, ya que definen cómo alcanzar mejores resultados productivos (Kaplan y Northon, 1992).

La determinación correcta de indicadores resulta una actividad compleja, a la vez que actual e importante (Medina León et al., 2011). El uso de índices sintéticos, para evaluar la eficiencia del sistema, ha cobrado una amplia difusión en los últimos tiempos en Cuba e internacionalmente, a juicio de Medina León et al. (2005) por las razones siguientes:

- el resultado es un único valor que permite una fácil comparación con períodos precedentes u otras empresas, así como el estudio de tendencias,
- los elementos contemplados en su creación son producto de un estudio científicamente argumentado, en el cual resultaron fuentes de la información académicos y empresarios reconocidos en la actividad que se estudia,
- no requiere que los empresarios tengan un conocimiento profundo sobre el tema que aborda el indicador para su utilización en la toma de decisiones,
- permiten ser automatizados fácilmente,
- resulta factible crear una relación causa – efecto entre los resultados alcanzados y los inductores de actuación,
- son herramientas que permiten un diagnóstico permanente del sistema, así como vincularse a otros procedimientos de mejora empresarial.

Medina León et al. (2011) plantea que, entre las limitaciones más comunes a estos índices sintéticos, se pueden citar:

- escasa utilización de software asociados a los índices sintéticos, a pesar de las facilidades que estos brindan para su automatización, y aún menor, el vínculo de los software creados a los sistemas informatizados existentes en las empresas,
- no se fijan criterios de evaluación para los elementos que forman parte de los indicadores, lo que implica evaluaciones no homogéneas en su aplicación,
- evalúan el sistema, limitados a diagnosticar los principales elementos provocadores de las desviaciones y no a incidir sobre sus inductores de actuación,
- limitado uso del carácter proactivo.

No obstante, el uso de índices sintéticos constituye una práctica ineludible en el proceso de medición, que contribuye al control y mejora de los sistemas, así como permite la comparación entre diferentes sectores y su aplicación en diversas áreas (Anexo 1.2).

Durante las últimas décadas las empresas, tanto nacionales como internacionales, han realizado estudios centrados en la definición, construcción y uso de indicadores para diversos objetivos tales como la evaluación analítica de fenómenos, el control de la eficacia de programas de acción, la medición del grado de consecución de objetivos globales, el asesoramiento en los procesos de planificación, etc., en todos los ámbitos de la sociedad. En cada uno de ellos, la definición de los indicadores y su proceso de elaboración y obtención venían determinados por los objetivos de cada estudio y las preferencias de los analistas (Domínguez Serrano *et al.*, 2011).

En el contexto de esta investigación, indicadores son los valores derivados de los datos primarios, y que suministran información sobre un proceso o etapa del proceso, determinado. Índices son indicadores agregados, basados en otros varios indicadores y datos. Se evidencia la tendencia del empleo de índices sintéticos para facilitar la toma de decisiones; aunque, a pesar de la amplia diversidad de índices sintéticos desarrollados, el empleo de técnicas de minería de datos en este empeño es poco frecuente.

Indicadores ambientales

Los indicadores ambientales corresponden a aquellos que se ocupan de describir y mostrar los estados y las principales dinámicas ambientales, es decir el estatus y la tendencia por ejemplo de: la biota y biodiversidad, la cantidad y calidad de agua, la calidad del aire respirable, la carga contaminante y renovabilidad de la oferta energética, la disponibilidad y extracción de algunos recursos naturales (bosques, pesca, agricultura), la contaminación urbana, la producción de desechos sólidos, el uso de agrotóxicos, la frecuencia e intensidad de los desastres naturales, entre otros (Martínez, 2009).

Al igual que los económicos y sociales, estos indicadores, permiten que los distintos actores y usuarios puedan compartir una base común de evidencias e información cuantitativa, selecta, procesada, descrita y contextualizada. Así, se facilita la objetivación de los procesos que es pertinente considerar a la hora de tomar decisiones, de intervenir y evaluar. Los indicadores ambientales son los que capturan los principales estadios y dinámicas del medioambiente en el territorio en cuestión, y permiten ser presentados en solitario o bien como parte integrante correspondiente a la dimensión ambiental de los indicadores de desarrollo sostenible (Pimentel de Oliveira Santos, 2020).

El uso de indicadores ambientales se ha extendido, no existe una definición única del concepto y éste varía de acuerdo a la empresa y a los objetivos específicos que se persiguen. Una de las definiciones más conocida y aceptada proviene de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), que desde hace varios años utiliza un conjunto de indicadores como información base para realizar evaluaciones periódicas del desempeño ambiental de los diferentes países que integran la organización. Un indicador ambiental es un parámetro o valor derivado de parámetros que proporciona información para describir el estado de un fenómeno, ambiente o área, con un significado que va más allá del directamente asociado con el valor del parámetro en sí mismo (Ebert, 1994).

Según el Florida Center for Public Management 1998, institución que desarrolló un sistema de indicadores con el fin de asesorar a las dependencias ambientales de la Unión Americana, un indicador ambiental es un elemento que describe, analiza y presenta información científicamente sustentada sobre las condiciones y tendencias ambientales y su significado. Por su parte, el Ministerio del Ambiente de Canadá lo define como una estadística o parámetro que, monitoreado a través del tiempo, proporciona información de la tendencia o las condiciones de un fenómeno más allá de la que se asocia a la estadística en sí misma. En particular, precisa que los indicadores ambientales son estadísticas clave seleccionadas que representan o resumen un aspecto significativo del estado del ambiente, la sustentabilidad de los recursos naturales y su relación con las actividades humanas (Múnera Espinal, 2011). Una de las principales ventajas de los indicadores ambientales es el hecho de que cuantifican importantes evoluciones en la gestión medioambiental de la empresa y las hacen comparables con el transcurso del tiempo. Si se determinan de una forma periódica, los indicadores medioambientales permiten detectar rápidamente tendencias opuestas y, por consiguiente, también pueden utilizarse como un sistema de alerta temprana (García Céspedes et al., 2014).

No es una práctica habitual de las empresas, impulsar el trabajo con indicadores ambientales, ellos son una alternativa más de las metodologías actualmente en desarrollo en el tema ambiental, de hecho, no todos los programas de un mismo estilo cuentan con una batería de indicadores ambientales. Un mismo tema implementado por distintos grupos de acción puede o no desarrollarse mediante un conjunto de indicadores ambientales (Neculqueo, 2010).

De acuerdo con todo lo anterior la autora corrobora que la utilidad y validez de estos indicadores de gestión radica en el uso que se les pueda dar y en el grado de interacción con las variables y datos de las organizaciones involucradas en la evaluación y gestión (Anexo 1.3. b). Los indicadores son una herramienta necesaria para alcanzar un estado deseado e ilustrarlo.

Indicadores de gestión ambiental

Una organización debería establecer indicadores ambientales medibles, dichos indicadores tienen que ser objetivos, verificables y reproducibles para así realizar una gestión enfocada en los procesos ambientales, además, de los procesos internos de las empresas. Deberían ser apropiados para las actividades, productos y servicios de la organización, coherentes con su política ambiental, prácticos, eficaces en cuanto a costos y tecnológicamente viables.

Los indicadores de gestión ambiental resumen extensos datos medioambientales en una cantidad limitada de información significativa, para asegurar una rápida evaluación de las principales mejoras y de los puntos débiles en la gestión ambiental de la empresa (Rico Gaviria, 2020).

Entre las principales funciones de los indicadores de gestión ambiental se encuentran las siguientes:

- detectar potenciales oportunidades de mejora,
- obtener y perseguir metas medioambientales,
- identificar oportunidades de mercado y potenciales de reducción de costos,
- evaluar el impacto medioambiental de la empresa,
- proporcionar datos esenciales para informes y declaraciones medioambientales exigibles, y
- favorecer la implementación de ISO 14001.

Una vez definidos y establecidos los indicadores de gestión ambiental, la mayor utilidad de éstos se encuentra al permitir cuantificar aspectos relacionados con al menos los siguientes puntos:

- Ahorro de costos: mejora en el control de materias primas y energía; mejor posición para obtener préstamos y subvenciones; optimización de los costos de residuos y

emisiones; reducción de los riesgos de accidentes y los costos de las reparaciones por daños al medioambiente, etc.

- Ventajas de competitividad: buena imagen de la empresa; relaciones con los agentes externos; aumento de motivación de los empleados.
- Cumplimiento de la legislación vigente aplicable.

Las organizaciones internacionales, gubernamentales y no gubernamentales publican regularmente informes sobre el estado del ambiente, con el empleo de datos ambientales existentes e indicadores para evaluar las condiciones actuales y las tendencias en el ambiente (Anexo 1.3. d).

Índices sintéticos de gestión ambiental

En los últimos años, se han llevado a cabo algunos intentos para desarrollar índices sintéticos relacionados con varios aspectos del ambiente dentro del marco del desarrollo sustentable. Sydsaeter, K. & Hammond, P. J. (1995) discutieron un acercamiento sistemático para medir y reportar la actuación de la política ambiental en el contexto del desarrollo sustentable y proveer de un marco conceptual (PSIR) para desarrollar índices sintéticos para contaminación/emisión, reducción de recursos, biodiversidad e impacto humano/exposición.

La Comisión de Desarrollo Sustentable de las Naciones Unidas lleva a cabo desde 1995 un programa de trabajo para indicadores de desarrollo sustentable, el cual incluía una lista de aproximadamente 130 indicadores organizados en el marco “Presión-Estado-Impacto-Respuesta”. En este marco, las fuerzas conductoras representan las actividades humanas, los procesos y patrones que tiene impacto sobre el desarrollo sustentable. En la reunión de expertos que se llevó a cabo en el 2000 en Canadá, los expertos acordaron entre otras cosas dejar de utilizar el esquema Presión – Estado – Respuesta y reducir a 59 el número de indicadores (de los cuales tan sólo un tercio formaban parte del conjunto original de 130 indicadores). Estos indicadores son desarrollados para ser utilizados en el proceso de toma de decisiones a nivel de país. La Comisión lleva a cabo este programa gracias al aporte de numerosas organizaciones y empresas en todo el mundo, dedicadas al estudio y desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad.

Recientemente el Foro Económico Mundial, en colaboración con el Centro de Derecho y Política Ambiental de la Universidad de Yale, en EEUU, y el Centro Internacional de Información de Ciencias de la Tierra (CIESIN), desarrolló el Índice Piloto de Sustentabilidad Ambiental. El índice está construido como un elemento de un proyecto jerárquico. Está basado en 5 componentes: (i) el estado de los sistemas ambientales - como suelo y agua-, (ii) presiones sobre el sistema –como contaminación-, (iii) factores de vulnerabilidad humana –como la pérdida de recursos alimenticios-, (iv) capacidad

social y empresarial para enfrentarse a desafíos ambientales, y (v) administración global en forma de esfuerzos colectivos para tratar con el calentamiento global y con otras influencias perjudiciales. El índice utiliza datos específicos de países con base en 22 indicadores diferentes que varían desde calidad del aire y salud ambiental hasta reducción de la contaminación. (Foro Económico Mundial, 2000)

El Grupo Consultivo sobre Indicadores de Desarrollo Sustentable, del Instituto Internacional para el Desarrollo Sustentable (IISD), desarrolla desde 1996 un "Índice de Calidad Ambiental" (Environmental Quality Index, EQI), como parte de un índice de Sustentabilidad Global, y que se complementa con información sobre rendimiento económico y salud social. El EQI incluye cuatro componentes: índice de presión ambiental, huellas ecológicas per capita, riesgo de los ecosistemas y del uso del suelo (Vicente, P., Marques, C., & Reis, E., 2021).

El Living Planet Index (LPI), elaborado por el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), es una medida de la salud de los ecosistemas globales y la biodiversidad, con base en datos que muestran el cambio promedio a través del tiempo en el estado de los bosques, agua dulce y ecosistemas marinos. Es un intento para cuantificar la extensión y severidad de la pérdida de la biodiversidad (Buschke, F.T., Hagan, J.G., Santini, L. & Coetzee, B.W., 2021).

El Proyecto Índice de Vulnerabilidad Ambiental, de la Comisión del Pacífico Sur en Geociencias Aplicadas (SOPAC) de Fiji, se enfoca en la vulnerabilidad del ambiente por los riesgos naturales y humanos. Incluye efectos sobre los aspectos físicos y biológicos de los ecosistemas, diversidad, poblaciones u organismos, comunidades y especies (PACC, 2009).

Uno de los primeros intentos de valorar el impacto humano en el ambiente fue la denominada Huella Ecológica, propuesta por Mathis Wackernagel y William Rees, en 1996. La Huella Ecológica es una medida de la carga impuesta por una población sobre la naturaleza. Representa el área del suelo que se requiere para sostener los niveles actuales de consumo de los recursos y la generación de desechos de esa población, expresado en unidades de Ha/persona. Sin embargo, las huellas ecológicas dependen en gran medida de los patrones de consumo de las sociedades y, además, el estudio se enfoca principalmente en países de América del Norte y Europa.

También cabe señalar los esfuerzos del World Resources Institute sobre el análisis de flujo de materiales (Material Flow Analysis) que está muy relacionado con los índices mencionados arriba y que pretende llevar a cabo desarrollos piloto en países de la zona (Anexo 1.3. c).

Entre los índices sintéticos creados en Cuba se encuentran los dirigidos a la evaluación del Nivel de Excelencia de la Distribución (EOD) (Hernández Maden,

1999); de la Capacidad y Gestión de la Capacidad Tecnológica (Brito Viñas, 2000); de la Excelencia Organizativa Industrial (EOI) (Suárez Mella, 2001), de la Eficiencia Financiera (IEF) (Nogueira Rivera, 2002), de la Excelencia Organizativa Hotelera (EOH) (Negrín Sosa, 2003), del desempeño de los procesos hospitalarios (Hernández Nariño, 2010), de la gestión de reservas de eficiencia basada en el costo de la calidad con enfoque generalizador (Ramos Alfonso, 2015), del clima y la comunicación organizacional (Jaquinet Espinosa, 2016), del alineamiento estratégico entre objetivos y procesos (IGAE) (González Arias, 2016), del nivel de servicio en instituciones de Atención Primaria de Salud (Rodríguez Sánchez, 2017), de los requerimientos higiénico-sanitarios de los alimentos (García Pulido, 2018), de la gestión del conocimiento en organizaciones productivas (Castillo Zúñiga *et al.*, 2019), de la calidad de vida urbana (Covas Varela, 2019), de la gestión de accesibilidad y movilidad en centros históricos cubanos (Santos Pérez, 2020) y de Gestión Ambiental, procedimiento para la construcción del índice validado con el empleo de técnicas de minería de datos (Pérez Martínez *et al.*, 2021).

Al margen de la presente investigación, no se encontraron índices sintéticos para evaluar la gestión ambiental empresarial basados en técnicas de minería de datos.

1.2.2. Métodos de construcción de índices sintéticos

Los procedimientos para la obtención de los índices sintéticos se diferencian fundamentalmente por la forma en la que se ponderan y agregan los indicadores del sistema inicial (Domínguez Serrano *et al.*, 2011).

Los métodos más utilizados en la práctica se reflejan a continuación:

- **Agregaciones simples:**

Parten de la base de que las unidades de medida de los subindicadores deben ser las mismas. La ponderación mediante pesos de la misma cuantía (Actis Di Pasquale, 2015) constituye la metodología más extendida y aplicada en investigaciones empíricas, dada su escasa dificultad operativa y la facilidad asociada a la interpretación de los resultados. Consiste básicamente en asignar a cada subindicador el mismo peso que a los demás, donde la información es agregada mediante una suma. La ponderación y agregación suele hacerse en niveles sucesivos de manera que previamente se ponderan y agregan una serie de variables para construir los subindicadores relativos a una determinada dimensión y, posteriormente, se agregan estos para construir el índice sintético.

- **Métodos participativos:**

Permiten obtener medidas sintéticas, definidas como sumas ponderadas, a partir de las valoraciones subjetivas mostradas por un conjunto de individuos de referencia, sobre los distintos aspectos que se desean evaluar en el sistema de partida. Esta

empieza a utilizarse con el objetivo de facilitar la obtención de índices sintéticos para evaluar conceptos sobre los que no es posible definir un sistema de indicadores cuantitativos adecuado. Entre los métodos participativos más utilizados, podemos destacar: el método del panel de expertos (Tsaur *et al.*, 2006; Ugwu *et al.*, 2006; López Sánchez *et al.*, 2018), el método de opinión pública (Cottrell *et al.*, 2004) y el procedimiento para la elaboración de índices integrales de gestión (Medina León *et al.*, 2014).

- Técnicas de análisis multivariante:

La aplicación de técnicas estadísticas, dentro del proceso de obtención de índices sintéticos, surge con el objetivo de solventar una doble problemática en este campo: la doble contabilización de información que puede existir en la agregación del sistema de indicadores y la asignación de valores concretos a las ponderaciones.

Análisis de Componentes Principales:

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica de estadística multivariante de la interdependencia (Sánchez López *et al.*, 2016), pues en ella todas sus variables tienen una importancia equivalente (Terrádez Gurrea, 2000).

Permite obtener medidas sintéticas que reflejan la máxima información posible proporcionada por el sistema de partida (Quiroga Juárez & Villalobos Escobedo, 2015). Su aplicación requiere la existencia de un cierto grado de correlación entre los indicadores que componen el sistema inicial (Marulanda Grisales, 2017).

Generalmente, esta técnica se aplica a los valores iniciales de los indicadores (Olivares, 2014) cuando están expresados en la misma unidad de medida, es decir, normalizados.

Análisis factorial:

Permite reducir el elevado número de variables que describen un fenómeno, de difícil interpretación, a un número menor de factores (Fernández Melián & Rodríguez de la Fuente, 2019) en común que expliquen básicamente lo mismo que las variables de partida.

Sin embargo, este método va más allá, pues su objetivo final es el de encontrar relaciones matemáticas que permitan expresar las variables originales a través de los factores comunes más los factores específicos de cada variable observada (Morales Vallejo, 2013).

Escalamiento Óptimo:

Permiten cuantificar las variables categóricas originales, basándose en una matriz de similitud o disimilitud entre todos o casi todos los pares de n objetos, que pueden ser generados mediante la información obtenida de los sujetos directamente acerca de

la similaridad entre todos los pares y/o pidiéndoles que clasifiquen en función de descriptores (Morales Jacob, 2004) y (Tapia López, 2007).

Análisis Conjunto:

Es una metodología que trata de estudiar el comportamiento de los consumidores (Ferreira Lopes, 2011) según la valoración que éstos realizan de las características (o atributos) de un determinado bien o servicio (Spairani Berrio & Roca Cladera, 2020). Básicamente, consiste en asumir que las alternativas a evaluar pueden ser definidas por una serie de atributos o características e interesa conocer qué importancia tiene cada atributo en concreto (utilidad parcial) en la decisión global de preferencia del individuo hacia esa alternativa (utilidad total) (Morales Plaza, 2017).

- Indicadores basados en distancia:

Permite detectar la mayor o menor urgencia de actuación en un determinado aspecto, en función de la mayor o menor distancia entre el estado en que se encuentra un fenómeno concreto y la situación a la que se desea llegar.

La agregación de las distancias definidas puede realizarse mediante el empleo de disímiles procedimientos alternativos: distancia CRL de Pearson (Domínguez Serrano *et al.*, 2011), distancia de Frechet (Miller, H. J., Jaegal, Y., & Raubal, M., 2019), distancia Generalizada de Mahalanobis (Gómez Silva, 2019), distancia de Stone (Domínguez Serrano *et al.*, 2011), distancia-I de Ivanovic (Hita, 2009) y distancia DP2 (Vizcaino López *et al.*, 2007).

- Técnicas de análisis multicriterio:

El papel del analista se reduce a la aplicación de la técnica de decisión multicriterio elegida, la asignación de pesos a cada criterio y la fijación de un procedimiento de agregación para la obtención del índice sintético. Estas decisiones serán diferentes en función del tipo de técnica aplicada.

Teoría de la Utilidad Multiatributo:

Busca expresar las preferencias del decisor en términos de la utilidad que le reporta, dentro de un contexto de la teoría de la decisión (Rios Insua & Jiménez, A., 2002) en condiciones de incertidumbre. Esta función proporciona una medida que permite comparar en términos relativos la situación de cada unidad para obtener una ordenación completa de las mismas en función de las preferencias mostradas por el decisor (Vega Clavijo, Prías Caicedo & Sierra Vargas, 2016).

Proceso Analítico Jerárquico (AHP):

Las metodologías definidas a partir de AHP (Jiménez, 2002) están pensadas para obtener medidas sintéticas en varias fases de agregación. Estas metodologías se basan en cuatro principios básicos de funcionamiento: la estructuración del problema mediante jerarquías; la valoración mediante una escala ratio derivada de la

comparación por pares entre los elementos de la jerarquía; el establecimiento de prioridades; y la consistencia lógica (Casabán Planells, 2020).

Métodos de sobreclasificación:

Conforman un conjunto de métodos de análisis multicriterio contruidos en torno al concepto teórico de la relación de superación. Para cada par de alternativas puede construirse un coeficiente o índice de concordancia asociado (Berumen, A., & Redondo, F., 2007) que muestre, en consideración con la totalidad de los criterios de decisión, el grado en el que una alternativa es mejor o igual que otra (De Vicente y Oliva, M. & Calvo, M. Á. M., 2005).

Procedimientos de agregación no compensatorios:

Esta metodología parte de la base de que, cuando se utilizan los métodos de agregación sobre un sistema de indicadores de carácter cuantitativo, los pesos asignados muestran las tasas de sustitución entre los indicadores, lo que obliga a tener en cuenta el carácter compensatorio del índice sintético obtenido. Este carácter compensatorio hace referencia a la posibilidad de que en un determinado caso las desventajas presentadas en un grupo de indicadores puedan ser compensadas por una mejor situación en otros. De esta forma, el índice sintético muestra el resultado neto que se obtiene al tener en cuenta las compensaciones que se producen entre los indicadores presentes en el sistema (Pérez León, 2010).

- Análisis Envolvente de Datos

El Análisis Envolvente de Datos (DEA) es una técnica no-paramétrica, determinista, que recurre a la programación matemática (Coll, 2000). Permite la construcción de una superficie envolvente, frontera eficiente o función de producción empírica, a partir de los datos disponibles del conjunto de Unidades objeto de estudio, de forma que las Unidades que determinan la envolvente son denominadas Unidades eficientes y aquellas que no permanecen sobre la misma son consideradas Unidades ineficientes (Campoverde et al., 2019). DEA permite la evaluación de la eficiencia relativa de cada una de las Unidades.

- Componentes No Observadas

Combinan relaciones estructurales con las propiedades de los filtros estadísticos. La principal característica de estos métodos es que incluyen una relación explícita entre la brecha producto y la inflación, y/o entre la brecha producto y la tasa de desempleo (Llosa, G. & Miller, S., 2005).

- Lógica Difusa

Es una herramienta matemática cuya amplia aplicabilidad se basa en la concepción de conjuntos con fronteras no exactas que se emplean en presencia de información imperfecta (Morales Luna, Guillermo 2002), que se ocupa de los problemas relativos a

la imprecisión, la incertidumbre, el razonamiento aproximado y la vulnerabilidad (Cos Guerra, O. & Velasco, P. R., 2019) y es un marco que tolera la imprecisión y la verdad parcial bajo un enfoque no estadístico y que puede ser construida basándose en el conocimiento de los expertos (Londoño Patiño, J. A., 2020).

El método de construcción de índices sintéticos más novedoso que se ha desarrollado en los últimos años es la Inteligencia Artificial (Corvalán, 2020), y entre las técnicas más empleadas resalta la minería de datos (Pérez Martínez, Naranjo Rey, *et al.*, 2021).

1.3. Inteligencia artificial: aplicación a la construcción de índices sintéticos

La Inteligencia Artificial (IA) es la capacidad de las máquinas para usar algoritmos, aprender de los datos y utilizar lo aprendido en la toma de decisiones tal y como lo haría un ser humano. Sin embargo, a diferencia de las personas, los dispositivos basados en IA no necesitan descansar y pueden analizar grandes volúmenes de información a la vez. Asimismo, la proporción de errores es significativamente menor en las máquinas que realizan las mismas tareas que sus contrapartes humanas (Rouhiainen, 2018).

La IA es una disciplina académica relacionada con la teoría de la computación cuyo objetivo es emular algunas de las facultades intelectuales humanas en sistemas artificiales. Inteligencia humana se refiere típicamente a procesos de percepción sensorial (visión, audición, etc.) y a sus consiguientes procesos de reconocimiento de patrones, por lo que las aplicaciones más habituales de la IA son el tratamiento de datos y la identificación de sistemas (Pérez Martínez, Garriga González & Benítez Miranda, 2015).

La IA se aplica a numerosas actividades humanas, y como líneas de investigación más explotadas destacan el razonamiento lógico, la traducción automática y comprensión del lenguaje natural, la robótica, la visión artificial y, especialmente, las técnicas de aprendizaje e ingeniería del conocimiento mediante minería de datos (Andrés Suárez, 2000).

1.3.1. Minería de datos

La minería de datos surge como producto de la evolución de las tecnologías de la información y de la necesidad de hacer uso de los grandes volúmenes de información existentes en las empresas, todo ello con el fin de extraer conocimiento que apoye a quienes hacen uso de ellas en la toma de decisiones (Rodríguez, 2010). Estudia métodos y algoritmos que permiten la extracción automática de información sintetizada y caracterizar las relaciones escondidas en la gran cantidad de datos; también se

pretende que la información obtenida posea capacidad predictiva, que facilite un análisis eficiente de los datos (Martínez Luna, 2001).

Este proceso se realiza mediante lo que se conoce con el término de mineros, algoritmos que buscan tendencias, anomalías, desviaciones o situaciones interesantes pero desconocidas y otros eventos importantes, que son colocados en las bodegas de datos. Utilizan, además de las bases de datos, la IA y la estadística (Martínez Luna, 2011).

Las técnicas de minería de datos persiguen el descubrimiento automático del conocimiento que está contenido en la información almacenada de forma ordenada en bases de datos (Pérez López & Santín González, 2007).

El empleo de técnicas de minería de datos (Pérez Martínez, Naranjo Rey, *et al.*, 2021), vislumbra como una alternativa en la construcción de índices sintéticos, en la concluida década esta variante de tratamiento de la información para generar conocimiento ha adquirido un mayor interés por parte de investigadores de diversas ramas del saber dada la objetividad que aporta a la concepción de estos instrumentos. Resaltan entre las técnicas de mayor aplicabilidad las provenientes de la estadística: análisis de varianza, regresión, análisis de agrupamiento, análisis discriminante y series de tiempo; y de la IA: Sistemas Expertos, Redes Neuronales Artificiales y Sistemas Inteligentes.

La minería se ha empleado en numerosos campos, que incluyen desde los ya conocidos casos de cesta de la compra hasta la bioinformática o investigaciones contra el terrorismo (Galindo & García, 2010); en la educación, en el comercio, en el sector financiero, en el sector agropecuario, en las ciencias sociales y en la tecnología (Rojas & Gomez, 2014); con presencia en el sector de la salud tanto para el estudio de enfermedades, diagnósticos y tratamientos (cáncer de próstata, enfermedades cardiovasculares, hipertensión arterial (Dávila Hernández & Sánchez Corales, 2012), cáncer (Gutiérrez, 2016), Parkinson y enfermedades tumorales, cáncer de cuello uterino, diabetes, dengue), como para mejorar el servicio de urgencias de los hospitales (Carrascal, Carrascal & Saldarriaga, 2015); y hasta llegar a desempeñar un rol protagónico en la política y gestión gubernamental, en la determinación de patrones de comportamiento en elecciones presidenciales para la selección de juntas receptoras del voto más representativas (Camana, 2016).

Se emplea, además, en trabajos con la web, en la minería de contenido (texto, imágenes, etiquetas, metadatos); minería de estructura (enlaces y sus relaciones); y minería de uso (interacción de las personas con la Web) (Baeza yates, 2009).

A pesar de las ventajas de utilizar la minería de datos como parte de la IA, no han sido muchas sus aplicaciones para la construcción de índices sintéticos. Babbar Richa y

Babbar Sakshi en (Babbar & Babbar, 2017) emplean el uso de la minería de datos para predecir el índice de calidad del agua de los ríos, con el empleo de las técnicas de vecino más cercano, árboles de decisión, redes bayesianas, redes neuronales artificiales, máquinas de vectores de apoyo y basadas en reglas, para desarrollar el entorno predictivo para clasificar la calidad del agua en términos comprensibles basados en el Índice general de contaminación.

Con el empleo de programas especializados en minería de datos y aprendizaje automático, (Afzal et al., 2019) analizan los mejores candidatos con respecto a las características estructurales predominantes y las combinaciones de características que los distinguen de los menos prometedores para identificar nuevas poliimidias (PI) con valores de índice de refracción (RI) excepcionales para su uso como materiales ópticos u optoelectrónicos.

Hanafizadeh, Saghaei & Hanafizadeh (2009) emplearon técnicas de minería de datos en la construcción de un índice para medir y analizar la brecha entre países en el área de la infraestructura y el acceso a las tecnologías de la información y la comunicación, Markov Chain Monte Carlo (MCMC) (para imputar datos faltantes) y Análisis Factorial Multietapa (FA) (para agregar los indicadores).

Para medir, de manera estable y cuantitativa, el impacto de las interferencias en el radar Li, Wang & Liu (2020) diseñaron un índice basado en la minería de datos a partir de los patrones principales extraídos de las muestras mediante un análisis sólido de componentes principales.

Para construir el Índice Sintético de Desempeño Institucional municipal colombiano, se adelantó un proceso de minería de datos, dirigido a ubicar indicadores activos que permitieran explicar intuitivamente el concepto de desempeño institucional (Ardila Delgado & García Solano, 2017).

Escasos son los estudios relacionados con índices sintéticos dedicados a la gestión ambiental y a elementos específicos de la misma. Las principales incursiones en este sentido están dirigidas a la creación de indicadores para la evaluación de la sostenibilidad ambiental (Shah, 2004), la selección de indicadores ambientales para la elaboración de una estrategia de evaluación ambiental (Donnelly et al., 2006), la evaluación del desempeño ambiental (Miranda Cuéllar et al., 2016), la evaluación de costos ambientales (Perera Conde et al., 2021) y un procedimiento para la construcción de un Índice Sintético de Gestión Ambiental validado con el empleo de técnicas de minería de datos (Pérez Martínez et al., 2021), como parte de la presente investigación doctoral.

En la gran mayoría de los casos consultados, la construcción de los índices sintéticos se basa en criterios de expertos, sin tener en cuenta técnicas de análisis de datos

basados en preceptos de la inteligencia artificial, como la minería de datos. El fin de la minería de datos es la realización de análisis automáticos o semiautomáticos de grandes cantidades de datos para extraer patrones desconocidos. Estos patrones resumen los datos de entrada para su empleo en el análisis adicional, aprendizaje automático y análisis predictivo.

A pesar de existir un gran número de técnicas y herramientas que emplean inteligencia artificial, su uso aún es insuficiente en algunas esferas, tales como la ambiental, donde el empleo de las mismas podría dar solución a disímiles problemas de forma más eficiente y prestar especial atención en la extracción de información.

1.3.2. Datos ambientales

Se hace preciso definir el concepto de datos como materia prima del trabajo estadístico y por consiguiente de la minería de datos, que aún no han sido descritos, validados, ni estructurados, y que sin ellos los indicadores carecerían de validez y exactitud, y no tendría sentido hablar de índices.

Los datos son un conjunto de valores numerales que se observan, registran o estiman respecto de determinada variable en algún punto del espacio y del tiempo, que habitualmente resultan de la aplicación de algún tipo de levantamiento estadístico (como una encuesta o la explotación de un registro administrativo), medición en terreno u otra forma de medición u observación como por ejemplo los diversos instrumentos de percepción remota (Martínez, 2009).

La producción de indicadores implica un proceso de agregación y síntesis en diferentes etapas, en la base del proceso de agregación se encuentran los datos que se obtienen a partir del monitoreo y de los procesos analíticos; con ellos se pueden elaborar estadísticas y series de tiempo, que alimentan la elaboración de indicadores e índices. Este proceso de análisis y síntesis de datos y elaboración de información debe realizarse de acuerdo a las diferentes etapas del proceso de toma de decisiones, para lo cual será necesario la elaboración de una metodología de selección determinada para los datos e indicadores. Obviamente, mientras mayor sea la disponibilidad de datos y estadísticas, más eficaz será el proceso de agregación, síntesis y desarrollo de indicadores (Pérez Martínez, Cabrera Hernández & Berrio Turiño, 2019-a).

Sin embargo, si bien existe gran cantidad de datos y estadísticas para la elaboración de indicadores (Anexo 1.3. a), las empresas y los encargados de la toma de decisiones, no utilizan toda la información disponible por una serie de razones; entre ellas: la dificultad en el acceso a datos confiables, la ausencia de metodologías comunes para la elaboración de información y la falta de marcos conceptuales

armonizados para el desarrollo y uso de indicadores en el ámbito mundial, regional y nacional.

Entre los problemas más comunes que se encuentran en América Latina y el Caribe, y específicamente en Cuba, para el desarrollo de proyectos de indicadores e índices ambientales, se pueden mencionar la falta de datos, falta de armonización entre datos generados por diferentes metodologías y para diferentes objetivos, falta de indicadores, análisis deficiente como consecuencia de la falta de datos, falta de comunicación interinstitucional, duplicación de esfuerzos, y por lo tanto, un uso limitado de estas herramientas en los procesos de toma de decisiones.

La revisión de la literatura y de la práctica confirma la necesidad de introducir un índice sintético para evaluar la gestión empresarial sobre el ambiente, cuya simplicidad facilite la toma de decisiones.

1.4. Conclusiones parciales

Como resultado de la revisión de la bibliografía y otras fuentes de información para la construcción del estado del arte y la práctica de la investigación que se resume en esta Tesis Doctoral, se concluye que:

1. La gestión ambiental debe ser considerada en la estrategia de las empresas, como fuente de dinamización, que permita solucionar los conflictos de responsabilidades, optimizar y simplificar el proceso de toma de decisiones basadas en datos integrales, una mayor coherencia y facilidad de manejo ambiental junto a la reducción de costos, incremento del rendimiento, las competencias y el entrenamiento de los miembros de la empresa.
2. A partir del análisis de normativas y legislaciones vigentes para la gestión ambiental en Cuba, se concluye que el marco legal existente regula y rige la política ambiental del país en consonancia con los objetivos de desarrollo sostenible. La gestión ambiental es una necesidad real, donde las empresas deben adoptar y evaluar sistemas y mecanismos de gestión ambiental en pos de alcanzar un desarrollo sostenible, con énfasis en la importancia de la evaluación ambiental mediante indicadores.
3. La falta de datos y su escasa fiabilidad perjudican la evaluación ambiental integrada en los planos regional y mundial, lo que conlleva a problemas relacionados con la obtención de resultados estadísticamente significativos a nivel formal (baja confiabilidad). La infraestructura de adquisición de datos y monitoreo de procesos en la mayor parte de los países en desarrollo tropieza con graves dificultades o no existe en absoluto debido a la limitación de recursos, personal y equipamiento.
4. En la literatura especializada resaltan los índices sintéticos como herramientas válidas destinadas a la gestión por procesos. En la gran mayoría de los casos

consultados, la construcción de los índices sintéticos se basa en criterios de expertos, sin tener en cuenta técnicas de análisis de datos basados en preceptos de la inteligencia artificial, como la minería de datos; con mayor énfasis en un insuficiente uso en algunas esferas, tales como la ambiental.

CAPÍTULO 2: INSTRUMENTO METODOLÓGICO PARA LA EVALUACIÓN DE LA GESTIÓN AMBIENTAL EMPRESARIAL

Derivado del análisis del estado del arte y la práctica relacionado con la gestión ambiental empresarial y como solución al problema científico planteado, en el presente capítulo se propone y fundamenta un instrumento metodológico, compuesto por un modelo que soporta conceptualmente un sistema de procedimientos (procedimiento general y específicos), diseñado para la evaluación de la gestión ambiental empresarial mediante la aplicación de un índice sintético. Constituyen referentes para su construcción las brechas identificadas del estudio del estado del arte y la práctica de la gestión empresarial, la gestión ambiental y la conjugación de ambas. Como resultado se presenta:

- El modelo conceptual y su procedimiento general para la evaluación de la gestión ambiental empresarial.
- Los procedimientos específicos para el levantamiento de la información inicial, la construcción y el pronóstico del Índice Sintético de Gestión Ambiental Empresarial mediante minería de datos.

La gestión ambiental debe ser medida y evaluada de manera objetiva y cuantitativa, con el fin de permitir una adecuada y pertinente toma de decisiones. Sin embargo, muchos juicios subjetivos y pronunciamientos vagos deben ser analizados y cuantificados antes de definir un índice de gestión ambiental empresarial fiable.

2.1. Concepción teórica y metodológica del modelo conceptual

La concepción teórica incluye enfoques, principios, objetivos, características distintivas y premisas consideradas por la autora para aplicar el modelo. Estos elementos se describen a continuación.

Enfoques:

- **Enfoque holístico:** se evidencia en la integración de las relaciones de influencia y dependencia entre componentes de la gestión ambiental empresarial y su entorno.
- **Enfoque de procesos:** a través del conocimiento, control y mejora de los procesos internos, con el consiguiente incremento del nivel de coherencia del sistema para alcanzar los objetivos planificados, a partir del análisis de los indicadores de desempeño de la gestión ambiental, que constituyen una expresión cuantitativa del comportamiento y desempeño de los procesos.
- **Enfoque estratégico:** mediante la obtención de pronósticos de comportamiento de la gestión ambiental empresarial a partir del análisis de los datos históricos de las empresas.

- **Enfoque de mejora continua:** dado por la evaluación sistemática de la gestión ambiental en las empresas cubanas que contribuya a la toma de decisiones y posibilite la implementación de buenas prácticas.

Principios:

- Carácter participativo, evidenciado en la cooperación de las empresas en varios momentos de la concepción e implementación del modelo; así como el apoyo del Citma y los proyectos de investigación asociados.
- Liderazgo y compromiso del Citma y de las agencias reguladoras ambientales con la implementación del modelo y los procedimientos propuestos.

Sistema de objetivos

Objetivo general:

Evaluar el desempeño de la gestión ambiental en las empresas cubanas mediante el Índice Sintético de Gestión Ambiental Empresarial (ISGAE).

Objetivos específicos:

1. Dotar al Citma y a las empresas de un modelo que permita la evaluación de la gestión ambiental mediante el ISGAE.
2. Describir las herramientas de gestión aplicadas, así como su secuenciación mediante la concepción del procedimiento general.
3. Garantizar el estricto cumplimiento del marco legal regulatorio en la implementación del modelo propuesto sobre la base de las normativas y resoluciones vigentes durante su concepción.

Características:

- Pertinencia, dada por la posibilidad que tiene el procedimiento de adecuarse a la solución de problemas, puesto que el índice resultante se obtiene de la simulación mediante el empleo de técnicas de minería de datos.
- Consistencia lógica, sustentada por la estructura, secuencia lógica, interrelación de elementos y coherencia de contenidos del modelo y su procedimiento general, encaminados a la solución de problemas relacionados con la presente investigación.
- Flexibilidad, debido a la aplicabilidad total o parcial del procedimiento según las condiciones concretas de cada empresa.

2.1.1. Descripción del modelo conceptual

El modelo propuesto (Figura 2.1) tiene como entrada la caracterización del estado actual de la gestión ambiental en las empresas cubanas. La caracterización está condicionada por la calidad de los datos aportados por las empresas, lo que constituye un factor de evaluación; y, por el diagnóstico ambiental que se realice, que representa

un proceso crítico específico. La transformación está condicionada por el marco legal regulatorio, conformado por las leyes, las resoluciones y las normativas vigentes a los efectos de la gestión ambiental nacional e internacional.

El despliegue del modelo confiere importancia a las características propias de las empresas donde será implementado, ya que parte del monitoreo de los datos ambientales reales, los parametriza y convierte en indicadores ambientales, a tono con la realidad de las empresas.

Dado que el listado de indicadores a medir puede tornarse engorroso en la práctica para los directivos de las empresas, el modelo concibe su concreción, mediante el uso de herramientas accesibles a la gestión multiescala, mediante el ISGAE, que permiten un mayor control y, por tanto, una toma de decisiones más efectiva.

La construcción del ISGAE se realiza mediante técnicas de minería de datos, lo que deriva en la eliminación de posibles errores humanos que se cometen durante el proceso de extracción y manipulación de los datos. Se resuelve también de este modo, el habitual problema de que no todas las variables sean importantes, algunas de ellas puedan ser variables irrelevantes o redundantes que no contribuyen de manera sustancial en tareas de clasificación o de análisis de datos. En estos escenarios se emplearon algoritmos capaces de clasificar datos, sin la necesidad de conocer la clase a la que pertenece cada objeto de la muestra.

El análisis del ISGAE permite el estudio del comportamiento de los indicadores ambientales en el tiempo, con la determinación de tendencias y posibles valores futuros, lo que propicia una valoración tendencial de las consecuencias de las acciones realizadas en la actualidad, para colaborar a la toma de decisiones con el propósito de ayudar a la administración para que marque tendencias, señale problemas y tome decisiones inteligentes.

La actualización y el seguimiento al ISGAE, así como el análisis predictivo del mismo, serán la piedra angular del proceso de mejora continua de la gestión ambiental en las empresas que apliquen el modelo. La retroalimentación y mejora continua, tanto de la concepción del modelo como de los resultados de su implementación, contribuyen al éxito de dicha gestión, al permitir el ajuste de desviaciones y el despliegue de acciones correctivas.

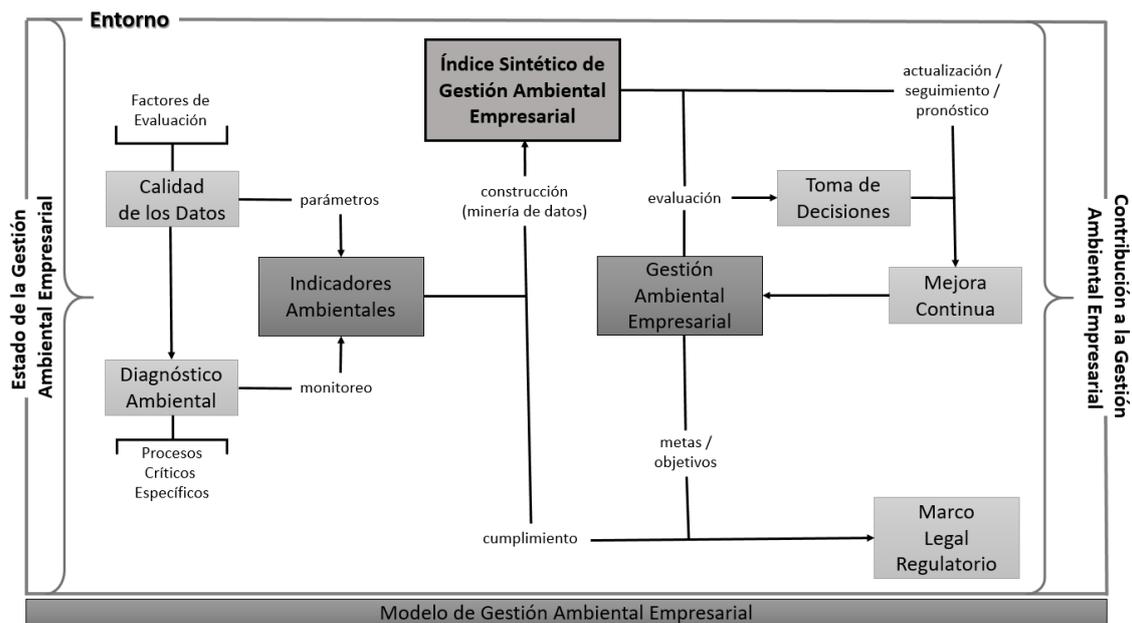


Figura 2.1. Modelo de Gestión Ambiental Empresarial mediante el ISGAE

Fuente: elaboración propia.

2.2. Procedimiento general para la implementación del modelo conceptual

2.2.1. Premisas para la aplicación del procedimiento

Para la aplicación del procedimiento general, se hace necesario el cumplimiento de un grupo de premisas que aseguren el éxito en su despliegue. Para ello, las empresas implicadas deben cumplir o estar dispuestas a crear un grupo de condiciones establecidas en las mismas. La comprobación de estas premisas genera dos situaciones: su cumplimiento, conlleva a la aplicación del procedimiento, al demostrarse la existencia de condiciones iniciales para favorecer su éxito; su incumplimiento, parcial o total, implicaría el aseguramiento previo de estas condiciones de partida.

- Manifiesto interés de las empresas en la aplicación del procedimiento.
- Apoyo del Citma para la aplicación del procedimiento en las empresas.
- Correspondencia de la gestión ambiental de las empresas con el marco legal regulatorio de la gestión ambiental en Cuba.
- Existencia de información estructurada (datos) sobre la gestión ambiental de las empresas donde se aplicará el procedimiento.

2.2.2. Descripción del procedimiento general

La figura 2.2 muestra el procedimiento general para la evaluación de la gestión ambiental empresarial, compuesto por tres fases y seis etapas, en las que se integran los procedimientos específicos asociados:

- **Fase 1. Preparación para la implementación**, compuesta por una etapa: Etapa 1.1. Diagnóstico ambiental (procedimiento para el levantamiento de la información inicial de la gestión ambiental empresarial).
- **Fase 2. Gestión ambiental empresarial**, compuesta por dos etapas: Etapa 2.1. Determinación de los indicadores ambientales y Etapa 2.2. Clasificación y predicción del ISGAE, compuesta por dos pasos fundamentales: construcción del ISGAE (procedimiento para la construcción del ISGAE mediante minería de datos), y predicción del comportamiento del ISGAE (procedimiento para el pronóstico del ISGAE mediante minería de datos).
- **Fase 3. Implementación del modelo de gestión ambiental empresarial**, compuesta por tres etapas: Etapa 3.1. Contribución al proceso de toma de decisiones, Etapa 3.2. Propuestas de mejoras y Etapa 3.3. Divulgación de los resultados.

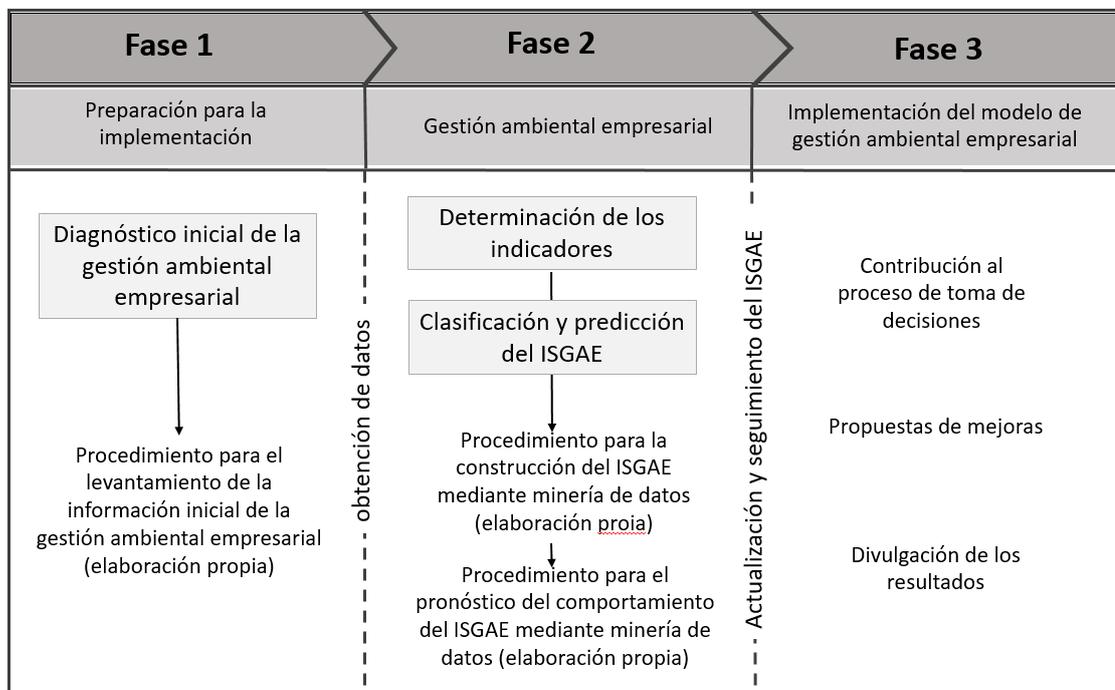


Figura 2.2. Procedimiento general para la implementación del modelo.

Fuente: elaboración propia.

Fase 1. Preparación para la implementación

La contextualización del modelo al caso de estudio es vital, debido a la diversidad presentada por las empresas cubanas en cuanto a su gestión ambiental. Por otra parte, es necesario sentar las bases para la obtención de la información que será procesada, en este sentido, el diagnóstico ambiental constituye la herramienta idónea para el levantamiento de los datos y de la situación existente en las empresas.

Etapa 1.1. Diagnóstico ambiental

Se realiza el levantamiento de la información inicial de la gestión ambiental, en esta etapa se determinan los indicadores ambientales existentes en la empresa y se construyen a partir de los datos almacenados, se verifica el cumplimiento de los requisitos prácticos de los indicadores, se define su importancia, se clasifican según la matriz P-E-I-R (Presión-Estado-Impacto-Respuesta) y se realiza el análisis de escenarios resultantes; finalmente, con la información capturada se elaboran las fichas técnicas de los indicadores y se almacenan en una base de datos (figura 2.3).

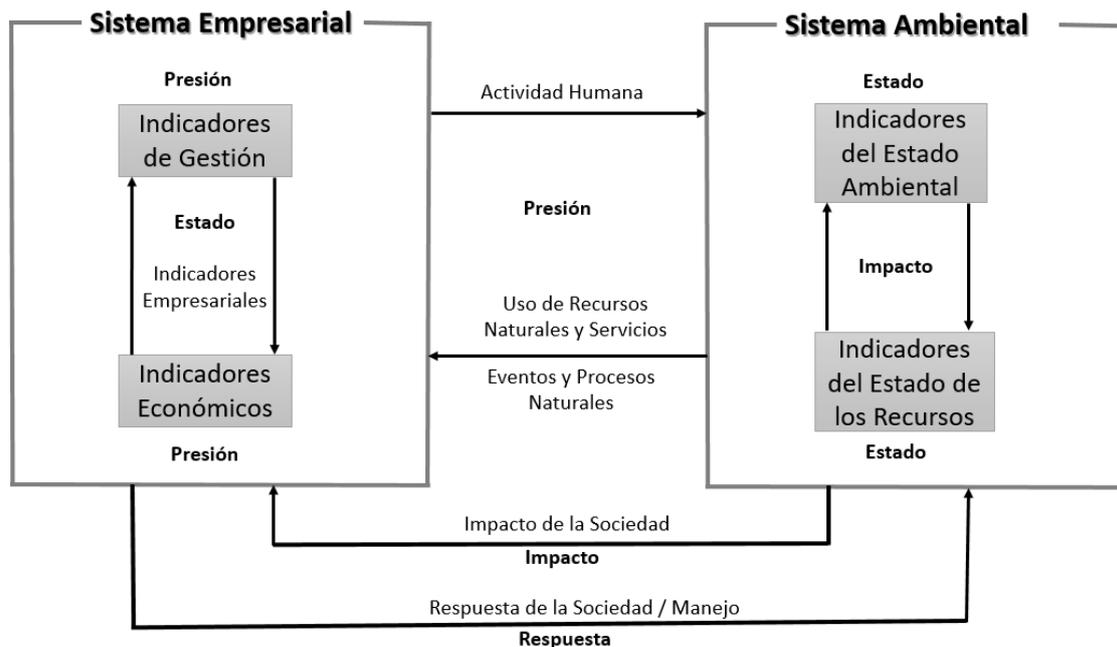


Figura 2.3. Modelo conceptual P-E-I-R en la gestión ambiental empresarial.

Fuente: elaboración propia.

Fase 2. Gestión ambiental empresarial

Se adecuan e integran herramientas de gestión según los requerimientos del desarrollo de la gestión ambiental empresarial. Su implementación sienta la base organizacional de soporte al manejo ambiental. Se construye el sistema de control del modelo, a partir del análisis del ISGAE resultantes del procesamiento de los indicadores obtenidos en el diagnóstico a partir del empleo de técnicas de minería de datos. Con el ISGAE se persigue homogenizar la información y facilitar el seguimiento por parte de las entidades reguladoras de la gestión ambiental en Cuba. Finalmente, se realiza un análisis predictivo del comportamiento del ISGAE, de modo que contribuya a la toma de decisiones.

Etapa 2.1. Determinación de los indicadores ambientales

Se analiza y procesa la información obtenida de la Fase 1, de modo que se puedan construir índices sintéticos a partir de la relación que pueda existir en el conjunto de datos, ya sean indicadores o parámetros. A partir de la integración y recopilación de

los datos almacenados previamente en la base de datos, se procede a la selección, limpieza y transformación de los mismos, lo que deriva en serie de datos seleccionados o vista minable.

Etapa 2.2. Clasificación y predicción del ISGAE

Mediante la aplicación de la minería de datos se identifican los patrones de comportamiento de los parámetros característicos del desarrollo del proceso, los cuales son evaluados e interpretados durante la generación de conocimiento, de cuya difusión y empleo resulta la construcción del ISGAE. La evaluación de dicho índice constituye un apoyo al proceso de toma de decisiones relacionado con la gestión ambiental empresarial. De esta forma se propone un procedimiento para la construcción del ISGAE, a partir de la integración de la minería de datos como herramienta de inteligencia artificial. El ISGAE obtenido es sometido a un proceso de actualización y seguimiento que permite la realización de pronósticos de comportamiento del mismo, a partir de la secuencia de datos históricos almacenados por las empresas.

Fase 3. Implementación del modelo de gestión ambiental empresarial

Una vez materializado el ISGAE, se procede a su implementación en correspondencia con el modelo de gestión ambiental empresarial propuesto, donde se evidencie una adecuada actualización, seguimiento y control del mismo. De modo que se contribuya a la gestión ambiental empresarial desde el proceso de toma de decisiones, las propuestas de mejoras a la gestión y la divulgación de los resultados para su análisis y generalización.

Etapa 3.1. Contribución al proceso de toma de decisiones

Con la creación del ISGAE y el análisis de escenarios posibles a partir de la información obtenida y el pronóstico de la misma, se pretende proporcionar a los directivos de las empresas información fiable y precisa del estado actual de su gestión y de sus proyecciones para el futuro.

Etapa 3.2. Propuestas de mejoras

Se analizan los resultados de la implementación del modelo. Se comparan las desviaciones en los resultados obtenidos con respecto a los valores propósitos establecidos y se despliegan las acciones correctivas que permitan mantener o situar los indicadores bajo control. De esta forma, se realizan ajustes de desviaciones detectadas tanto en su concepción, como en el resultado de la introducción a la práctica de las acciones de mejora propuestas

Etapa 3.3. Divulgación de los resultados

Los resultados obtenidos en el proceso de implementación del modelo, son socializados desde la plataforma web del Observatorio Ambiental Costatenas (OBSAM-Costatenas)¹.

2.3. Procedimientos específicos asociados al procedimiento

2.3.1. Procedimiento para el levantamiento de la información inicial de la gestión ambiental empresarial

El procedimiento específico para el levantamiento de la información inicial de la gestión ambiental, se compone de dos etapas y siete pasos (figura 2.4): **Etapa 1. Determinación de los indicadores**, con los pasos (1.1) verificación de los requisitos prácticos de los indicadores, (1.2) selección y clasificación de los indicadores, (1.3) definición de importancia de los indicadores, (1.4) clasificación de los indicadores según la matriz P-E-I-R, y (1.5) análisis de escenarios; **Etapa 2. Elaboración de las fichas técnicas de los indicadores y de la Base de Datos de Indicadores**, con los pasos (2.1) elaboración de las fichas técnicas de los indicadores y (2.2) elaboración de la base de datos de los indicadores.

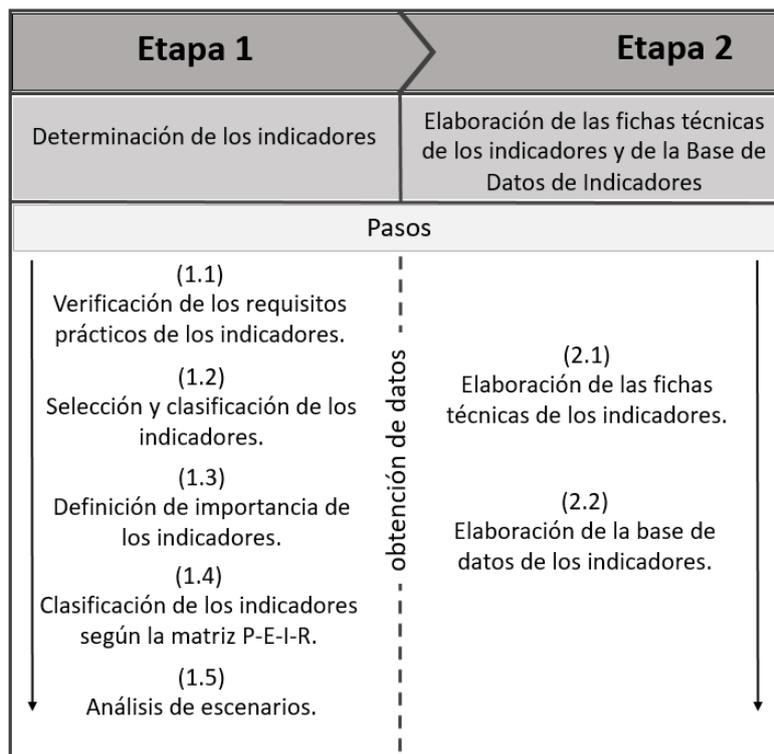


Figura 2.4. . Procedimiento para el levantamiento de la información inicial de la gestión ambiental empresarial.

¹ disponible en: www.obsamcostatenas.umcc.cu

La web del Observatorio Ambiental Costatenas constituye un resultado de esta investigación.

Fuente: elaboración propia.

Etapa 1. Determinación de los indicadores

Los indicadores son transportadores de información, cuyo propósito es reducir una cantidad mayor de información que al mismo tiempo representa un fenómeno más amplio que su calidad o valor inmediato y de esta forma, la información es más manejable y accesible. Los indicadores miden la información, de manera que su significado se vuelve más visible de inmediato y simplifican los datos sobre los fenómenos complejos, de forma que facilitan la comunicación.

Paso 1.1. Verificación de los requisitos prácticos de los indicadores:

- Los valores de los indicadores deben ser medibles (o al menos observables).
- Los datos deben estar disponibles al momento o deben ser obtenibles.
- Fuentes principales de datos y de información.

Agrega Kessler (1998), que las fuentes principales de datos y de información en la mayor parte de los países se pueden clasificar de la manera siguiente:

- Fuentes de datos primarios: estadísticas oficiales, registros de datos formales (por ejemplo, de organismos gubernamentales) y sistemas de monitoreo y control interno de las empresas.
- Fuentes de datos secundarios: datos de fotos aéreas o Sistemas de Información Geográfica (SIG), encuestas de campo y medidas; entrevistas y registros de datos informales (por ejemplo, clínicas, mercados, asociaciones de campesinos, entre otros).

El primer principio orientador de este paso es minimizar la recopilación propia de datos primarios y usar al máximo las fuentes de información secundaria, desde el punto de vista de la eficiencia, para determinar si son útiles de acuerdo a los objetivos e indicadores que quieran construirse.

Las fuentes típicas de datos estadísticos y formales son:

- La Oficina Nacional de Estadística e Información (censo poblacional, censo agrícola, encuestas al nivel de país, principalmente datos socioeconómicos).
- Los Ministerios Sectoriales (por ejemplo, de Agricultura, Forestal, Industria, Energía y Minas, entre otros).
- El Citma (recopila, controla y dirige toda la información generada por las empresas en materia de ciencia, tecnología y medioambiente).
- Universidades, Centros de Estudios y Entidades de Ciencia, Tecnología e Innovación (ECTI).

Paso 1.2. Selección de los indicadores

Hay varios tipos conocidos de indicadores de acuerdo al propósito de lo que se quiera medir o informar, por lo que resulta necesario establecer la diferencia entre los mismos.

La premisa principal para seleccionar indicadores ambientales, es conocer de qué tipo de información se dispone y cuál de ella, es realmente de utilidad para informar rápido y de forma confiable, sobre las situaciones del medioambiente en el marco empresarial.

Mientras que la selección de los indicadores es cuestión de combinar el sentido común con la experiencia y el conocimiento de las fuentes de datos estadísticos, es posible aplicar ciertos criterios para seleccionar los mejores indicadores. Idealmente, los indicadores deben ser:

1. Válidos, para que realmente se relacionen con lo que se supone que indiquen o midan, por:
 - ser bien fundamentados teóricamente (base científico);
 - ser sensibles a cambios (provocados por el ser humano) en la situación observada;
 - tener un significado más amplio que la situación real (un valor más allá del valor superficial, que representa un fenómeno más amplio);
 - ser suficientemente específico y confiable (tanto en tiempo como en escala geográfica).
2. Claros en contenido, relativamente sencillos y transparentes, más comprensibles que las estadísticas generales.
3. Conocidos (fuente de información disponible) o medibles y comprobables técnicamente (es decir, la medición por diferentes personas generará un resultado similar).
4. Efectivos en costo en términos de los métodos y tiempo necesarios para recoger los datos.
5. Relevantes para los objetivos de la empresa donde se determinarán.

La mejor selección de indicadores es aquella que se construye para los fines específicos que se persiguen y con la mejor información de que se dispone.

Paso 1.3. Definición de importancia de los indicadores

- **Imprescindible:** Aquellos que determinan el área clave evaluada y cuya ausencia impediría la implementación de la estrategia ambiental de la empresa y el avance en el mejoramiento de las condiciones ambientales en sentido general.

- **Importante:** Aquellos indicadores que tienen una influencia marcada en su área clave, toda vez que su exclusión dejaría un vacío de interés ambiental, aunque son de carácter menos general que los anteriores.
- **De interés:** Aquellos que probablemente se vinculan con otros indicadores, o su interés no determina la implementación de la estrategia ambiental, o su impacto es muy local, u otras razones que induzcan a considerarlo como de menor importancia entre todos.

Paso 1.4. Clasificación de los indicadores según la matriz P-E-I-R

El modelo de los indicadores P-E-I-R, es la referencia de los indicadores utilizados para la evaluación del desempeño ambiental de las empresas (EEA, 1999).

Este marco ordenador tuvo su origen en los indicadores formulados por la Comisión de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas y posteriormente han sido empleados por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) en los reportes mundiales compiladores de estadísticas (GEO), desde hace varios años con muy buenos resultados para evaluar a diferentes escalas, ya sea a escala planetaria, regional, nacional, hasta ecosistemas naturales y los modificados por el hombre (OECD, 1998).

El modelo es simple y es empleado para hacer efectiva la participación de todos los actores sociales, principalmente las comunidades, empresas, asociaciones y tomadores de decisiones. Los indicadores se clasifican en función de las cuatro categorías de la matriz P-E-I-R.

Indicadores de Presión:

Los indicadores de presión reflejan (el cambio en) el nivel de presión por actividades humanas, y tienen vínculos indirectos con las calidades ambientales a ser monitoreadas (PNUMA, 2001). Además, pueden ser clasificados en:

- indicadores ambientales de presión directos en el ambiente;
- indicadores ambientales de presión indirectos en el ambiente;
- indicadores ambientales en el campo de políticas, economía, cambio social.

Relacionan las causas de los problemas ambientales sobre los cuales deben actuar las respuestas del gobierno y de la sociedad para conservar y mejorar el estado del medioambiente. La determinación de las causas del estado del medioambiente local, se realiza sobre la base de:

- El análisis de la dinámica socioeconómica local.
- Presiones sobre los recursos naturales.
- El proceso de ocupación del territorio y del uso de suelo en el tiempo;
- La distribución de las actividades económicas y sus impactos

- La dinámica de crecimiento de la población
- La estructura de los sistemas de abastecimiento de agua, saneamiento, transporte, telecomunicaciones y energía.
- La infraestructura de servicios sociales (salud, educación, cultura y entretenimiento) y su distribución socio-económica espacial.
- La dinámica económica, que es el principal factor determinante del desarrollo y de presión sobre el medioambiente: consumo de materias primas, uso de suelos, actividades de producción (agricultura, construcción, de instalaciones, autopistas y calles, almacenaje, entre otros), destino final de los residuos sólidos y líquidos resultantes del proceso de producción.

Indicadores de Estado:

Los indicadores de estado reflejan la condición de las funciones ambientales, y tienen vínculos directos con las calidades ambientales a ser monitoreadas. Describen las condiciones y la calidad del medioambiente. Expresan el resultado de las presiones antrópicas del proceso de desarrollo en el medioambiente, desde el punto de vista de la calidad y de la cantidad de los recursos, de acuerdo a:

- Características de los ecosistemas locales.
- Análisis de los recursos de los ecosistemas: aire, agua, suelo, biodiversidad, ambiente construido, residuos sólidos, bosques y vulnerabilidad.
- Síntesis del estado del medioambiente local.

En el momento inicial del análisis, se deben tomar en cuenta las transformaciones ya ocurridas en función del modelo del desarrollo de la empresa en cuestión. La evaluación del estado del medioambiente debe tomar en consideración elementos cuantitativos y cualitativos. La relación entre ambos tipos de variables es bastante estrecha y mutuamente determinante. Para tal efecto, cuando se busca evaluar el estado del medioambiente, lo que se pretende básicamente es determinar su calidad, en términos de los elementos que lo constituyen y de los ecosistemas que lo acompañan.

El enfoque sobre los ecosistemas debe tomar en cuenta los recursos naturales disponibles a partir de los hábitats significativos que contribuyen en las actividades de las empresas. Los elementos para caracterizar estos ecosistemas son los siguientes:

- Descripción de las principales características de los ecosistemas predominantes, desde el punto de vista del ambiente físico y de sus recursos, con inclusión de la diversidad biológica existente y los diferentes hábitats que ocupen.
- Las características climáticas (pluviosidad, humedad relativa del aire, etc.).

- La vulnerabilidad a desastres naturales y aquellos que se originan de la acción antrópica.
- La incidencia de desastres climáticos naturales.
- El tipo de ocupación de las áreas de riesgo.

Indicadores de Impacto:

Orientan acerca de los efectos del estado del medioambiente sobre diferentes ámbitos de interés para las actividades humanas, tales como la calidad de vida, la economía urbana, los ecosistemas, la vulnerabilidad urbana y sobre el nivel político-institucional.

Los impactos al medioambiente que afectan a los ecosistemas y a sus elementos (agua, aire, suelo, biodiversidad) se reflejan en la calidad de vida de los habitantes de la ciudad, en el medioambiente construido (edificios, infraestructura urbana, etc.) y en las actividades económicas que estimulan el desarrollo de la ciudad.

Los indicadores del impacto favorecen el análisis estratégico, en el cual las decisiones identifican las prioridades de acción e inversión. Los datos de impacto que se agreguen en el análisis general son dirigidos a la evolución de los aspectos económicos y sociales, por consiguiente, pueden servir para que las personas que realizan la formulación de políticas, calculen las dimensiones de las características externas generadas por los daños ambientales.

Deben considerarse como impactos la vulnerabilidad a accidentes naturales o provocados, que pueden ser traducidos en los datos cuantitativos para subsidiar el análisis de gestión de riesgos locales. Los datos cuantitativos deben organizarse por temas: ecosistema, calidad de vida, economía urbana, nivel político e institucional y vulnerabilidad urbana.

Los Indicadores de Impacto a considerar (transversales en su mayoría), son los siguientes:

- Pérdida de la biodiversidad.
- Pérdida del paisaje.
- Costos que incluyen captación y tratamiento de agua.
- Incidencia de inundaciones.
- Gasto en obras de contención y prevención de riesgos ambientales.
- Alteración del microclima.

Indicadores de Respuesta:

Los indicadores ambientales de respuesta reflejan las medidas de respuesta a los problemas. Ello significa evaluar los instrumentos de intervención que estos sectores crean para promover cambios en las dinámicas de presión sobre el ambiente, de manera que disminuya o elimine el impacto negativo que pueda tener sobre los

recursos ambientales considerados, tomados por separado o en su integración en los ecosistemas.

Estos instrumentos de respuesta utilizan herramientas particulares y tienen consecuencias específicas, en función de analizar su eficacia en reorientar la acción de los agentes sociales y la presión que ejercen sobre el medioambiente.

Se expresan en diferentes indicadores de los instrumentos de la gestión ambiental empresarial para evaluar las medidas de mejoría, protección, limitación, ordenamiento y reglamentación, tomadas por el gobierno local, las entidades de la sociedad civil, las empresas o por los individuos, para enfrentar los problemas detectados en el medioambiente, particularmente, los factores de presión antrópica sobre los recursos del medioambiente.

Indicadores político-administrativos:

- Control de emisiones de fuentes fijas y móviles.
- Presencia de las acciones de la Estrategia Ambiental.
- Educación ambiental.
- Destino de los recursos con prioridad en las inversiones para el mantenimiento y para la renovación y áreas de actuación negativa
- Políticas (de protección ambiental, de desarrollo local, de control de la contaminación ambiental).
- Normativas/legislativas (normas, reglamentos, leyes ambientales que incurran a nivel de empresa, asignación de términos de compromisos ambientales y aplicación de criterios (ISO 14,000)).

Indicadores económicos:

- Notificaciones preventivas y multas.

Indicadores tecnológicos:

- Inversión en la gestión de residuos sólidos.
- Procesos (nuevas tecnologías de producción, de tratamiento de residuos líquidos y sólidos, de emisión de gases industriales contaminantes, de recuperación de áreas degradadas, de materiales reciclados.
- Productos (filtros industriales, aerosoles sin Cloro-Fluor-Carbono)

Indicadores de intervención física:

- Total de áreas rehabilitadas/Total de áreas degradadas.
- Inversión en áreas verdes, inversión en la recuperación ambiental.
- Inversión en sistemas de suministro de agua y alcantarillado sanitario.
- En áreas sujetas a inundaciones (tipos de obra, volumen de recursos, área y población beneficiadas).

Indicadores de instrumentos socioculturales, educacionales y de comunicación pública:

- Educación ambiental.
- Presencia de acciones de la Estrategia Ambiental.
- Uso de la tecnología de la Información.

Paso 1.5. Análisis de escenarios

Una vez cumplidos los cuatro objetivos del análisis de la información por indicadores PEIR y de los datos de posibles escenarios, se formulan los indicadores que formarán parte del proceso de construcción del ISGAE, que orienten a los que tomen las decisiones. Se debe siempre indicar a qué factores de presión, condición ambiental y a qué impactos se pretende dar respuestas. Representan una visión sintética del conjunto de los orígenes y de las características de los problemas ambientales existentes, los impactos que generan, así como las respuestas producidas y las políticas propuestas para enfrentarlos.

La elaboración de escenarios implica poner en marcha las posibles visiones del futuro a partir de las opciones hechas en el presente. Estos escenarios deberán contribuir para que los encargados de tomar las decisiones evalúen el impacto de su acción u omisión, frente a los problemas ambientales.

Su construcción demanda el uso de información cualitativa y de datos cuantitativos. Algunas tendencias pueden ser delimitadas con menor grado de incertidumbre, para esto, la información cuantitativa es más útil. El resultado será una mezcla de los indicadores, tendencias y metas potenciales con textos de explicación que representen la historia. Los escenarios se construyen a partir de tres tipos de tendencias:

1. Tendencia de inercia.

Considerada como la posibilidad de que ninguna respuesta sea formulada para enfrentar los problemas ambientales detectados, o de que tales respuestas no sean adecuadas, o que aun las condiciones de implementación no favorezcan el alcance de los objetivos. En este caso, el escenario futuro proyectará una ampliación o profundización de los problemas ambientales detectados.

2. Tendencia del mejor de los casos u optimista.

Es aquella situación en la cual las respuestas del gobierno local y de la sociedad estarían perfectamente adecuadas a los problemas, y en la cual no hay obstáculos que impidan la implementación de las respuestas. En este caso, el escenario proyectará la mejoría del estado del medioambiente local, en todo o en los sectores que sufrieran la intervención de agentes sociales.

3. Tendencia del peor de los casos o pesimista.

Es aquella en la que no se tiene ninguna respuesta a los problemas con los que se enfrenta, o en la que las condiciones de implementación de respuestas no contribuyen o forman obstáculos difíciles de superar, o en la que las decisiones equivocadas de los agentes sociales profundicen o amplíen los factores de presión sobre el medioambiente.

Etapas 2. Elaboración de las fichas técnicas de los indicadores y de la Base de Datos de Indicadores

La representación gráfica (tablas) de la información, facilita el acceso y manejo de la misma, sintetiza los datos (parámetros) en indicadores y los almacena en estructuras (bases de datos) que permiten su posterior interpretación y pronóstico.

Pasos 2.1. Elaboración de las fichas técnicas de los indicadores

La ficha propuesta (tabla 2.1) presenta un esquema sencillo, fácil de desarrollar en las empresas y responde a una organización analítica coherente con un enfoque basado en la actualización y el seguimiento. De esta forma, se cuenta con información sintética sobre la integración de consideraciones ambientales en las empresas, información que debería ser básica para la toma de decisiones relacionadas con la gestión ambiental empresarial.

La ficha de indicadores propuesta, constituye el estándar para la captura y representación que posteriormente será procesada para la construcción del ISGAE, Dichas fichas serán almacenadas en una base de datos de acuerdo a una estructura de metadatos, lo que facilita el proceso de minería de datos. Los metadatos permiten la generación de estadísticas y patrones que se pueden aplicar a nuevos datos para generar predicciones de comportamiento y deducir relaciones y asociaciones. Una vez obtenida esta información, se procede a aplicar los procedimientos para la construcción y el pronóstico de comportamiento del ISGAE mediante técnicas de minería de datos, procedimientos que implementados en la lógica del negocio y del sistema del OBSAM-Costatenas, y que se ejecutan de manera transparente a los usuarios del mismo, lo que potencia y generaliza su utilización.

Tabla 2.1. Ficha de presentación del indicador.

PRESENTACION DEL INDICADOR	
Indicador	
Definición e importancia	
Categoría del indicador	
Unidad de medida	
Periodicidad	
Escala de análisis	
Fuente	
Observaciones	

INTERPRETACION DEL INDICADOR	
Valor actual	
Tendencia actual	
Tendencia deseada	
Pronóstico	
Evaluación	
TABLAS, GRÁFICOS Y MAPAS	

Fuente: elaboración propia.

Paso 2.2. Elaboración de la base de datos de los indicadores

La predicción de un indicador se hace posible si se logra encontrar un modelo capaz de pronosticar el comportamiento de los parámetros que lo sintetiza. Estos son predecibles si se cuenta con un amplio historial de datos y adaptamos un modelo capaz de simular su comportamiento. Para la creación y entrenamiento del modelo se empleará una base de datos que almacene los valores de los indicadores, y los parámetros ambientales que más influyen en el comportamiento de estos indicadores y que reflejan una marcada estacionalidad, fenómeno muy recurrente en variables ambientales.

Los datos serán almacenados en formato *.xls* (hoja de cálculo de Microsoft Excel), para luego ser exportados al formato *.csv* (comma-separated values), e introducidos en una base de datos PostgreSQL.

2.3.2. Procedimiento para la construcción del ISGAE mediante minería de datos

El procedimiento parte de la gestión ambiental empresarial, a partir de los datos históricos de las empresas. El objetivo es realizar un procedimiento de clasificación el cual permita crear índices sintéticos a partir de la relación que pueda existir en un conjunto de datos ya sean indicadores o parámetros (figura 2.5). A partir de la integración y recopilación de estos se genera el almacén o base de datos, el que a través de la selección, limpieza y transformación origina una serie de datos seleccionados o vista minable. Mediante la aplicación de la minería de datos se identifican los patrones de comportamiento de los parámetros característicos del desarrollo del proceso, los cuales son evaluados e interpretados durante la generación de conocimiento, de cuya difusión y empleo resulta la construcción del ISGAE. La evaluación de dicho índice constituye un apoyo al proceso de toma de decisiones relacionado con la gestión ambiental empresarial. De esta forma se propone un procedimiento para la construcción del ISGAE, a partir de la integración de la minería de datos como herramienta de inteligencia artificial (Anexo 3.2).

El procedimiento se compone de cinco etapas y ocho pasos: **Etapa 1. Integración y recopilación**, con los pasos (1.1) selección de los datos, (1.2) normalización de los datos y (1.3) separación del conjunto de datos de prueba y el conjunto de datos de entrenamiento; **Etapa 2. Selección, limpieza y transformación**, con los pasos (2.1) selección de las técnicas de minería de datos y (2.2) representación de sensibilidad; **Etapa 3. Minería de datos**, con el paso (3.1) caracterización de los datos, clasificación y clúster; **Etapa 4. Evaluación e interpretación**, con los pasos (4.1) creación del clasificador y (4.2) entrenamiento, validación y prueba; y la **Etapa 5. Difusión y empleo**.

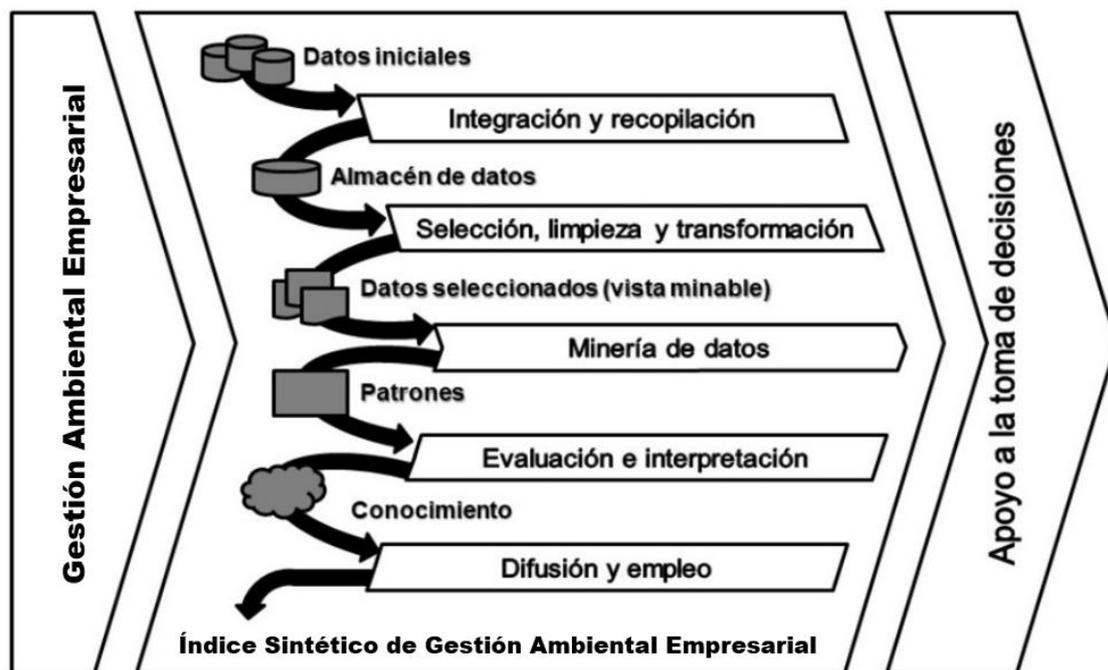


Figura 2.5. Procedimiento para la construcción del ISGAE.

Fuente: (Pérez Martínez *et al.*, 2021).

Etapa 1. Integración y recopilación

Consiste en la identificación del conjunto de datos de entrenamiento, validación y pruebas para el preprocesamiento. En esta etapa se seleccionan los datos iniciales que serán procesados. Se emplean los datos previamente almacenados en el sistema gestor de base de datos PostgreSQL, en el segundo paso de la etapa dos del procedimiento para el levantamiento de la información inicial.

El procesamiento de los datos se realizará en el software RStudio, un entorno de desarrollo integrado para el lenguaje de programación R, dedicado a la computación estadística y gráficos. Incluye una consola, editor de sintaxis que apoya la ejecución de código, así como herramientas para el trazado, la depuración y la gestión del espacio de trabajo. Este software es a menudo utilizado en este tipo de trabajos porque, a decir de (Sánchez Villena, 2019), es un software libre muy potente para el

análisis de datos, generador de gráficos y cuenta con paquetes especializados que sirven a diferentes ciencias.

RStudio está disponible para Windows, Mac y Linux o para navegadores conectados a RStudio Server o RStudio Server Pro (Debian / Ubuntu, RedHat / CentOS, y SUSE Linux). RStudio también proporciona el entorno informático estadístico R.

La elección de la herramienta se sustenta en que es software libre, maneja un entorno de trabajo agradable y cuenta con una vasta cantidad de librerías para el desarrollo de aplicaciones estadísticas. Ofrece opciones de representación a partir de gráficos y tablas y cuenta con la posibilidad de conectarse a innumerables bases de datos entre las que se encuentra PostgreSQL, necesaria para el desarrollo de la investigación.

Paso 1.1. Selección de los datos

Los datos previamente almacenados en una base de datos de PostgreSQL, serán importados en RStudio para su posterior análisis.

```
library(RPostgreSQL)
leer<-function(parametro="ph")
{
  parametro<-paste("'",parametro, sep = "'")
  parametro<-paste(parametro,"'",sep = "'")
  con<-dbConnect(PostgreSQL(),user="postgres",password="admin",dbn
ame="obsam",port="5432")
  consulta<-paste("SELECT id FROM parametro WHERE nombre=",paramet
ro,sep = " ")
  idParametro<-dbGetQuery(con,consulta)
  consulta<-paste("SELECT id FROM relacion WHERE parametro=",idPar
ametro$id,sep = " ")
  idMediciones<-dbGetQuery(con,consulta)
  valores<-dbGetQuery(con,"SELECT * FROM medicion")
  return(data<-valores[valores$id== idMediciones,])
}
```

El fragmento de código muestra como se establece la conexión a la base de datos y las consultas SQL (Structured Query Language) pertinentes para la obtención de los datos solicitados. Con la base de datos cargada correctamente se puede proceder a la normalización de los datos con el empleo de RStudio.

Paso 1.2. Normalización de los datos

Previo a la ejecución de los algoritmos es necesario transformar los datos a partir de la normalización de sus atributos, de forma tal que sus valores estén en un rango entre 0 y 1. Los datos serán transformados a una estructura *data frame* para hacer posible su manipulación en el lenguaje R.

Paso 1.3. Separación del conjunto de datos de prueba y el conjunto de datos de entrenamiento

En concordancia con las buenas prácticas registradas por la literatura (Couser, 2010), es importante dividir los datos en varios conjuntos lo que se conoce como método “*hold out*”, que consiste en mantener aparte una porción de los datos como conjunto de datos de prueba, pues en el proceso de desarrollo, se entrena el procedimiento con la fracción restante de datos, los parámetros son ajustados con los datos de validación, y finalmente es evaluado el rendimiento con el conjunto de datos de prueba que fue separado.

Etapas 2. Selección, limpieza y transformación

Consiste en la determinación de las técnicas de *Machine Learning* a emplear en la clasificación de los indicadores. En esta etapa se procesan los datos iniciales hasta obtener un conjunto de datos minables, este tratamiento se realiza con el empleo de métodos de minería de datos mediante la herramienta RStudio.

Paso 2.1. Selección de las técnicas de minería de datos

Paso 2.1. a) Análisis de Componentes Principales (PCA)

El análisis de componentes principales permite reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos, con la consiguiente transformación del conjunto de variables originales en otro conjunto de variables correlacionadas llamadas componentes principales.

Paso 2.1. b) Árboles de decisión

Los árboles de decisión son una serie de decisiones o condiciones organizadas de forma jerárquica, a modo de árbol, en el que a los nodos terminales se les llaman hojas y a cada nodo no terminal del árbol se asocia un atributo y este a su vez a una condición, que determina cuáles datos de la muestra entran en esa rama (Sutton Charani, 2013), de tal manera que la decisión final se puede determinar de acuerdo a las condiciones que se cumplen desde la raíz del árbol hasta algunas de sus hojas lo que facilita la interpretación (López, 2006). Los árboles de decisión que se usan para predecir variables categóricas se llaman árboles de clasificación, mientras que los árboles de decisión que se utilizan para predecir variables continuas se llaman árboles de regresión (Alcover, R., et al., 2007).

Paso 2.1. c) Random Forest

Random Forest es una técnica que combina una cantidad grande de árboles de decisión independientes probados sobre conjuntos de datos aleatorios con igual distribución (QuanDare, 2019). La fase de aprendizaje consiste en crear muchos árboles de decisión independientes, construyéndolos a partir de datos de entrada

ligeramente distintos. Se altera, por tanto, el conjunto inicial de partida (Breiman, 2019), del siguiente modo:

- Se selecciona aleatoriamente con reemplazamiento un porcentaje de datos de la muestra total. Es habitual incluir un segundo nivel aleatoriedad, esta vez con incidencia en los atributos.
- En cada nodo, al seleccionar la partición óptima, se tiene en cuenta sólo una porción de los atributos, elegidos al azar en cada ocasión. Una vez que se generan muchos árboles, la fase de clasificación se lleva a cabo de la siguiente forma.
- Cada árbol se evalúa de forma independiente y la predicción del bosque será la media de todos sus árboles en caso de que sea un problema de regresión, cuando se trate de un problema de clasificación realizara un voto mayoritario sobre todos los arboles del bosque es decir la clase con mayor voto.

Paso 2.2. Representación de sensibilidad

La curva ROC (Receiver Operating Characteristic) es una representación gráfica del rendimiento del clasificador que muestra la distribución de las fracciones de verdaderos positivos y de falsos positivos. La fracción de verdaderos positivos se conoce como sensibilidad, sería la probabilidad de clasificar correctamente a un individuo cuyo estado real sea definido como positivo. La especificidad es la probabilidad de clasificar correctamente a un individuo cuyo estado real sea clasificado como negativo. Esto es igual a restar uno de la fracción de falsos positivos (Pérez Martínez & García del Toro, 2017).

La curva ROC también es conocida como la representación de sensibilidad, cada resultado de predicción representa un punto en el espacio ROC.

Etapa 3. Minería de datos

Consiste en la construcción del conjunto de datos para entrenamiento, validación y prueba a utilizar en el clasificador. En esta etapa se obtienen los patrones presentes en el conjunto de datos minables, a partir del análisis estadístico de las series temporales obtenidas mediante el empleo de métodos de minería de datos ajustados de las librerías de la herramienta RStudio.

Paso 3.1. Caracterización de los datos, clasificación y clusters

Paso 3.1. a) Transformación de los datos en una serie temporal

Una serie de tiempo es una lista de unidades de tiempo ordenadas tales como fechas, semestres o trimestres, cada una de las cuales se asocia a un valor. Las series de tiempo son un modo estructurado de representar datos. Visualmente, es una curva que evoluciona a lo largo del tiempo. El pronóstico de las series de tiempo significa una extensión de los valores históricos al futuro, donde aún no hay mediciones

disponibles. Existen dos variables estructurales principales que definen un pronóstico de serie de tiempo, el período, que representa la frecuencia con la que se miden los datos y el horizonte, que representa la cantidad de períodos por adelantado que deben ser pronosticados.

Las series temporales se pueden definir como un caso particular de los procesos estocásticos, ya que un proceso estocástico es una secuencia de variables aleatorias, ordenadas y equidistantes cronológicamente referidas a una característica observable en diferentes momentos. El análisis de series temporales explica el hecho de que los puntos de datos tomados a lo largo del tiempo pueden tener una estructura interna (como la autocorrelación, la tendencia o la variación estacional) que debe tenerse en cuenta.

Paso 3.1. b) Análisis de la serie temporal

La forma más sencilla de comenzar el análisis de una serie temporal es mediante su representación gráfica. El gráfico que se emplea para representar las series temporales es el de secuencia. Estos son diagramas de líneas en los cuales el tiempo se representa en el eje de abscisas (x), y la variable cuya evolución en el tiempo estudiamos en el eje de ordenadas (y). Para diagramas de dispersión simples, se usará *plot*. Sin embargo, existen métodos de trazado para muchos objetos R, incluidas funciones, marcos de datos y objetos de densidad. Esta función tiene un comportamiento especial, pues en función del tipo de dato que le demos como argumento, generará diferentes tipos de gráfica. Además, para cada tipo de gráfico, podremos ajustar diferentes parámetros que controlan su aspecto, dentro de esta misma función. *plot()* siempre pide un argumento x, que corresponde al eje X de una gráfica. x requiere un vector y si no especificamos este argumento, obtendremos un error y no se creará una gráfica. El resto de los argumentos de *plot()* son opcionales, pero el más importante es y. Este argumento también requiere un vector y corresponde al eje Y de la gráfica.

Paso 3.1. c) Método de descomposición

Los métodos de descomposición estacional son eminentemente descriptivos. Tratan de separar la serie en subseries correspondientes a la tendencia, la estacionalidad y el ruido (componente aleatorio).

En ocasiones tendencia y estacionalidad se enmascaran, a veces una tendencia marcada puede no permitir ver la estacionalidad, y viceversa. Los métodos de descomposición estacional separan tendencia, estacionalidad y ruido, pero no predicen. Para predecir es necesario combinarlos con métodos de ajuste de tendencia. De esta forma realizaremos un ajuste de tendencia con el fin de obtener un procedimiento extrapolable, y le añadiremos la estacionalidad.

El primer paso a seguir a la hora de descomponer una serie es determinar cómo se combinan sus componentes. Las combinaciones aditiva y multiplicativa son las más habituales. Decimos que estamos en presencia de una aditiva cuando a pesar del crecimiento de la tendencia, la varianza y la media se mantienen estáticas, en cambio las multiplicativas son cuando la varianza y la media varían en consecuencia de la tendencia.

Según las fuentes consultadas, las pruebas más utilizadas para este fin son:

- Prueba de Dickey-Fuller aumentada (ADF) es una versión aumentada de la prueba Dickey-Fuller para un conjunto más amplio y más complejo de procedimientos de series de tiempo.
- Prueba de Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin. Su hipótesis nula es que no posee raíz unitaria.
- Prueba de Phillips-Perron cuya hipótesis nula es que posee raíz unitaria. Se basa en la prueba de Dickey-Fuller.

Etapas 4. Evaluación e interpretación

Consiste en la construcción, entrenamiento y validación de los clasificadores basados en los procedimientos identificados, y escoger el que ofrezca los mejores resultados. En esta etapa se genera conocimiento de la información obtenida de procesar los datos iniciales.

Se extrajo el conocimiento mediante la minería de datos, se obtuvo un procedimiento que representó patrones de comportamiento observados en los valores de las variables del problema o relaciones de asociación entre dichas variables. A partir de la aplicación de los métodos Clústeres, Árbol de decisión y Reglas de asociación.

Paso 4.1. Creación del clasificador

Para crear un clasificador, el algoritmo analiza primero los datos proporcionados, en busca de tipos específicos de patrones o tendencias. El algoritmo usa los resultados de este análisis en un gran número de iteraciones para determinar los parámetros óptimos para crear el procedimiento de minería de datos. A continuación, estos parámetros se aplican en todo el conjunto de datos para extraer patrones procesables y estadísticas detalladas. El procedimiento de minería de datos que crea un algoritmo a partir de los datos puede tomar diversas formas, incluye:

- Un conjunto de clústeres que describió cómo se relacionan los casos de un conjunto de datos.
- Un árbol de decisión que predijo un resultado y que describió cómo afectan a este los distintos criterios.
- Un conjunto de reglas que describieron cómo se agrupaban los datos.

Paso 4.2. Entrenamiento, validación y prueba

Una vez realizada la lectura y particionamiento de los datos, estos son sometidos a un proceso de entrenamiento, validación y prueba.

El primero de los posibles procedimientos de clasificación estará basado en los árboles de decisión. Para la construcción de otro posible procedimiento se utilizará el algoritmo randomForest, una vez aplicada esta técnica se analizará la precisión de la misma.

Etapa 5. Difusión y empleo

La automatización de procesos tecnológicos sobre bases de la eficiencia, el ahorro y empleo de soluciones nacionales para la industria y los servicios, y tiene entre sus direcciones principales la vigilancia temprana de las condiciones medioambientales que exigen de sistemas de medición y adquisición de datos.

En el proceso de análisis e interpretación de los datos ambientales, resulta de vital importancia la selección de los indicadores que permitan medir de forma más eficiente el resultado de la gestión ambiental empresarial en correspondencia a las particularidades que definen los procesos productivos o de servicios. No debe perderse de vista que los indicadores en si no constituyen un fin, sino que sus resultados son el efecto de diversas causas que se generan en los procesos y que por ello es imprescindible su adecuada interpretación para la toma de decisiones que posibiliten la solución de los problemas. Desde esta perspectiva, lo mejor que se puede hacer es extraer algunos aprendizajes de la experiencia vivida para prevenir problemas similares en el futuro. En el camino hacia la búsqueda de soluciones y la prevención de escenarios futuros se hace imprescindible el uso de herramientas y procesos que ayuden al correcto desenvolvimiento de las entidades empresariales en lo que a su gestión se refiere. La importancia de contar con herramientas que cumplan eficientemente con esta función, radica principalmente en la aplicación de medidas oportunas que puedan ayudar a mejorar la gestión ambiental empresarial. Ello apunta hacia el establecimiento exitoso de un sistema de vigilancia temprana, evaluación compleja y perfeccionamiento continuado de los aspectos tecnológicos sostenibles, en su estrecha interconexión con las dimensiones económico-productivas y socio-culturales.

La implementación efectiva de una política tecnológica que contribuya a mejorar la actividad empresarial, y que comprenda el control de las tecnologías existentes en el país; a fin de promover su modernización sistemática en función de la eficiencia energética, eficacia productiva, impacto ambiental y enfrentamiento al cambio climático, y que contribuya a elevar la soberanía tecnológica en ramas estratégicas.

En este sentido, puesta en funcionamiento de un Observatorio Ambiental, interpretados como una herramienta de vanguardia, que coloca la información que genera al alcance de las personas a las que está dirigida, que gestiona sus inputs, así como controla y mide sus outputs y que parte del análisis del pasado y el presente para pronosticar el futuro, constituye el medio idóneo para la difusión y empleo del ISGAE.

Los Observatorios Ambientales representan pasos importantes hacia la automatización de procesos tecnológicos, lo cual tiene en la actualidad un mínimo desarrollo conceptual y mucho menos práctico en Cuba, lo que influye negativamente en la independencia tecnológica.

De esta forma, la automatización de indicadores ambientales y del ISGAE a través del Observatorio Ambiental, permitirá la obtención de información implícita y facilitará los análisis especialmente enfocados para las condiciones estos entornos, con el fin de anticipar posibles situaciones de deterioro que comprometan su estado y funcionamiento como sistemas ambientales complejos.

En este punto, es válido aclarar que el cálculo del ISGAE mediante técnicas de minería de datos, se realiza de forma automática mediante una interfaz del OBSAM-Costatenas, el mismo, es capaz de recopilar la información detectada con la aplicación del procedimiento específico para el levantamiento de la información inicial de la gestión ambiental y almacenadas en la base de datos, de acuerdo a la estructura propuesta para la construcción de metadatos (ficha de los indicadores).

2.3.3. Procedimiento para el pronóstico del comportamiento del ISGAE mediante minería de datos

El procedimiento específico para el pronóstico del comportamiento del ISGAE mediante minería de datos, se compone de dos etapas y cinco pasos: **Etapas 1. Simulación**, con los pasos (1.1) construcción del dataset, (1.2) normalización del dataset, (1.3) validación de los modelos y (1.4) evaluación del pronóstico; **Etapas 2. Aplicación**, con el paso (2.1) OBSAM-Costatenas como herramienta tecnológica.

Etapas 1. Simulación

La investigación se realiza en el software RStudio, un entorno de desarrollo integrado para el lenguaje de programación R, dedicado a la computación estadística y gráficos. Incluye una consola, editor de sintaxis que apoya la ejecución de código, así como herramientas para el trazado, la depuración y la gestión del espacio de trabajo. Este software, a decir de (Sánchez-Villena, 2019), es un software libre muy potente para el análisis de datos, generador de gráficos y cuenta con paquetes especializados que sirven a diferentes ciencias. La simulación basada en técnicas de minería de datos

permite obtener resultados estadísticamente significativos y con un alto grado de confiabilidad formal, ya que omite el factor de subjetividad presente en otros métodos prospectivos como por ejemplo, el criterio de expertos.

Paso 1.1. Construcción del dataset

Los datos a emplear en esta investigación están disponibles en la web Banco Mundial de Datos. Esta web ofrece datos de acceso abierto y gratuito sobre el desarrollo mundial. El Banco Mundial de Datos brinda la posibilidad de descargas en diversos formatos como csv, xml y excel. Los datos deben aparecer en formato csv, para ser introducidos en una base de datos postgresQL.

Paso 1.2. Normalización del dataset

Según (Geoghegan, 2006), el uso de series temporales es muy común en diferentes campos como la economía para la cotización de las existencias en los mercados o la cantidad de desempleados, las ciencias sociales para las inscripciones en las escuelas, la medicina para la cantidad de casos de influenza en un período dado o la evaluación de diferentes medicamentos en pacientes con hipertensión, la meteorología para el análisis de diferentes fenómenos naturales, entre otros.

Los datos se convierten en una serie temporal para realizar un análisis más profundo y la posterior aplicación de diferentes modelos de predicción. Una serie puede ser no estacionaria por una variación en la media, una variación en la varianza o por la presencia de estacionalidad. Esto significa que si existe alguno de estos casos es necesario aplicar transformaciones en la serie. Por lo observado se evidencia que la serie no es estacionaria en media porque esta varía en el tiempo. También presenta variación cada cierto periodo y es normal en este tipo de estudios porque las variables ambientales tienden a disminuir o aumentar en el tiempo (ejemplo en verano o invierno).

A partir del análisis anterior se seleccionan para la normalización del dataset, los métodos de descomposición y de suavizado exponencial para contrastar sus resultados y elegir el mejor modelo.

Método de descomposición

Estos métodos tratan de separar la serie en subseries de tendencia, estacionalidad y ruido por lo que son especialmente descriptivos. ARIMA es muy utilizado en trabajos de predicción. En algunas investigaciones como (Hirata et al., 2015) y (Xu et al., 2019) se combina este modelo con redes neuronales para mejorar su precisión, aunque si se logra una buena selección de los parámetros como en (Schmidt et al., 2018) y (Wang et al., 2019) se logran importantes resultados sin necesidad de mayores requerimientos de cómputo (Nury et al., 2017) realiza una comparación del desenvolvimiento entre las redes neuronales artificiales y el modelo ARIMA para la

predicción de la temperatura en Bangladesh y este último resultó ser el de mejores resultados.

Una vez obtenida la serie aproximadamente estacionaria y no estacional similar a la original, se procede a la construcción del modelo predictivo.

En estadística y econometría, en particular en series temporales, un modelo autorregresivo integrado de promedio móvil o ARIMA (acrónimo del inglés autoregressive integrated moving average) es un modelo estadístico de regresión lineal en otras palabras significa que utiliza sus propios retrasos con el fin de encontrar patrones para una predicción hacia el futuro. Las estimaciones futuras vienen explicadas por los datos del pasado y no por variables independientes. El modelo ARIMA necesita identificar los coeficientes y número de regresiones que se utilizarán, se caracteriza por 3 términos p , d , q , donde p hace relación al orden del término AR, q es el orden del término MA y d es la cantidad de diferenciación requerida para que las series de tiempo sean estacionarias. Este modelo es muy sensible a la precisión con que se determinen sus coeficientes, cuando no se encuentran correlacionados y son independientes entre sí el modelo funciona de manera óptima.

En la investigación de (Parra et al., 2020) se define matemáticamente que el modelo de regresión automática (AR) es aquel donde $Y(t)$ depende solo de sus propios retrasos (ecuación 2.1).

$$Y_t = \alpha + \beta_1 Y_{t-1} + \beta_2 Y_{t-2} + \dots + \beta_p Y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (2.1)$$

Donde Y_{t-1} es el rezago 1 de la serie, β_1 es el coeficiente del modelo y α es el término de intercepción, también estimado en el modelo. De la misma forma, el modelo de media móvil pura (MA) es aquel en el que $Y(t)$ depende de los errores de pronóstico rezagados (ecuación 2.2).

$$Y_t = \alpha + \varepsilon_t + \Phi_1 \varepsilon_{t-1} + \Phi_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \Phi_q \varepsilon_{t-q} \quad (2.2)$$

Donde los términos de error son los errores de los modelos autorregresivos de los respectivos retrasos. Los errores ε_t y ε_{t-1} son los errores de las (ecuaciones 2.3 y 2.4):

$$Y_t = \beta_1 Y_{t-1} + \beta_2 Y_{t-2} + \dots + \beta_0 Y_0 + \varepsilon_t \quad (2.3)$$

$$Y_{t-1} = \beta_1 Y_{t-2} + \beta_2 Y_{t-3} + \dots + \beta_0 Y_0 + \varepsilon_{t-1} \quad (2.4)$$

Los procesos autorregresivos presentan función de autocorrelación parcial (ACFP) con un número finito de valores distinto de cero. Un proceso $AR(p)$ tiene los primeros p términos de la función de autocorrelación parcial distintos de cero y los demás son nulos. En la práctica se considera que una muestra dada proviene de un proceso autorregresivo de orden p si los términos de la función de autocorrelación parcial son

casi cero a partir del que ocupa el lugar p . Un valor se considera casi cero cuando su módulo es inferior a $\frac{2}{\sqrt{T}}$. Los programas de ordenador constituyen la franja $(-\frac{2}{\sqrt{T}}; \frac{2}{\sqrt{T}})$ y detectan los valores de la ACFP que caen fuera de ella.

Los procesos de medias móviles presentan función de autocorrelación con un número finita de valores distintos de cero. Un proceso $MA(q)$ tiene los primeros q términos de la función de autocorrelación distintos de cero y los demás son nulos. Las dos propiedades descritas son muy importantes con vistas a la identificación de un proceso mediante el análisis de las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial.

Método de suavizado exponencial

Las técnicas de suavizado exponencial son de tipo predictivo, por lo que pueden utilizarse para predecir a corto plazo en las series temporales. Proporcionan previsiones razonables para horizontes de predicción inmediatos. Los resultados que se obtienen con ellas son satisfactorios, incluso cuando no se dispone de un gran número de datos históricos (aunque a mayor histórico de datos, más exactitud presentará el modelo en sus predicciones). A diferencia de los métodos de descomposición estacional, para aplicar los de suavizado no es necesario convertir la serie en una aproximadamente estacionaria, pues existen modelos para series no afectadas por tendencia ni estacionalidad, para series con tendencia y para series con tendencia y estacionalidad.

El modelo Holt-Winters reúne un conjunto de procedimientos que conforman el centro de la familia de series temporales de suavizado exponencial. A diferencia de muchas otras técnicas, este modelo fue seleccionado porque puede adaptarse fácilmente a cambios y tendencias, así como a patrones estacionales. En comparación con otras técnicas, como ARIMA, el tiempo necesario para calcular el pronóstico es considerablemente más rápido. Su aplicación en entornos de negocio es muy común, se utiliza habitualmente por muchas compañías para pronosticar la demanda a corto plazo cuando los datos de venta contienen tendencias y patrones estacionales de un modo subyacente.

Holt-Winters es un modelo estático de predicción aplicado a series de tiempo caracterizadas por estacionalidad y tendencia lineal, basado en el método de medias móviles de peso exponencial (EWMA). Este modelo divide los datos analizados en tres partes, cada una es representada por una ecuación de tipo EWMA. (Pena *et al.*, 2013).

Paso 1.3. Validación de los modelos

La prueba de Ljung-Box es un tipo de prueba estadística de si un grupo cualquiera de autocorrelaciones de una serie de tiempo son diferentes de cero. En lugar de probar la

aleatoriedad en cada retardo distinto, esta prueba la aleatoriedad en general basado en un número de retardos.

Esta prueba también es conocida como la prueba Q de Ljung-Box, y está estrechamente relacionada con la prueba de Box-Pierce. Esta es una versión simplificada de la estadística de Ljung-Box para los cuales los estudios de simulación posteriores han demostrado un rendimiento deficiente.

- H0: Los datos se distribuyen de forma independiente (es decir, las correlaciones en la población de la que se toma la muestra son 0, de modo que cualquier correlación observada en los datos es el resultado de la aleatoriedad del proceso de muestreo).
- Ha: Los datos no se distribuyen de forma independiente.

Para seleccionar el modelo que mejor ajuste posee, se emplea AIC. El criterio de información de Akaike (AIC) es una medida de la calidad relativa de un modelo estadístico en un conjunto dado de datos. El AIC proporciona un medio para la selección del modelo, valora un sacrificio entre la complejidad del modelo y la bondad de ajuste del modelo. Ofrece una estimación relativa de la información pérdida cuando se utiliza un modelo determinado para representar el proceso que genera los datos. Por lo que el modelo que presente menor pérdida de datos será el de más ajuste a los datos.

Paso 1.4. Evaluación del pronóstico

Para evaluar el modelo planteado para la solución se propone emplear el indicador de Porcentaje de Error Medio Absoluto (MAPE) por su fácil interpretación, el cual se calcula según (ecuación 2.5):

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{(y_t - \hat{y}_t)}{y_t} \right| (100)}{n} \quad (2.5)$$

Dónde:

y_t : Es el valor observado (valor real del indicador)

\hat{y}_t : Es el valor pronosticado (predicción del indicador)

n : Es la cantidad de observaciones

Dong (2021) realiza una revisión bibliográfica del estado actual de los modelos de predicción para los distintos parámetros ambientales.

Etapa 2. Aplicación

Tanto el cálculo de los indicadores, como la construcción del ISGAE y sus pronósticos de comportamiento, puede realizarse desde la web del OBSAM-Costatenas, en un proceso que es totalmente transparente para los usuarios de la misma. En esta etapa se integra y procesa toda la información almacenada en la base de datos y obtenida

con la implementación de los procedimientos propuestos, desde el desarrollo de las etapas y pasos anteriores.

Paso 2.1. OBSAM-Costatenas como herramienta tecnológica

OBSAM-Costatenas tiene como misión fundamental proporcionar información relevante y oportuna al proceso de toma de decisiones sobre el desarrollo de la gestión ambiental de sus empresas.

Parte de su quehacer es suministrar esta información en forma de indicadores e ISGAE de modo que el análisis pertinente sobre los derroteros ambientales pueda integrar los diferentes factores ambientales, sociales, económicos y tecnológicos.

Además de proporcionar a las empresas acceso a bases de datos de series históricas en el campo ambiental; y a la vez coadyuvar al mejoramiento de los sistemas de información de las mismas.

Por otra parte, el observatorio acumula experiencias interesantes de trabajo en el contexto de la empresa y las devuelve mediante la producción de los informes ambientales. Lo que resulta provechoso, ya que permite mostrar capacidad de coordinación, interacción y rendición de cuentas hacia los interesados.

Igualmente, lleva a cabo informes de prospectiva para anticipar posibles escenarios futuros respecto a la sostenibilidad y los principales riesgos que se ciernen sobre ella, que se elaboraron con las más avanzadas técnicas cuantitativas (minería de datos).

En este sentido, el OBSAM-Costatenas desarrolla y potencia una red de capacidades técnicas y científicas basada en los departamentos universitarios, centros de investigación y otras entidades públicas y privadas que proporcionen la mejor información disponible y con base científica para que sea incorporada en los informes.

La naturaleza interdisciplinaria del tema ambiente, así como la universalidad de su alcance y la urgencia por encontrar soluciones ponen sobre la mesa un significativo reto a la comunidad científica. El OBSAM-Costatenas ofrece a la sociedad la posibilidad de tener acceso a información relevante sobre esta temática, por medio de las actividades que se plantean dentro de la agenda ambiental.

Las principales funciones del OBSAM-Costatenas en este sentido son;

- Gestión de parámetros (entrada de datos).
- Gestión de indicadores (cálculo de indicadores).
- Gestión de ISGAE (cálculo del ISGAE).
- Representación de los indicadores en el mapa (vínculo con Sistemas de Información Geográfica, representación espacial y georeferencias).
- Predicción del comportamiento de los parámetros, indicadores e ISGAE.
- Generación de Reportes.

2.4. Validación teórica del procedimiento general

En concordancia con (João Fernandes, 2016) no siempre resulta viable demostrar la validez de las propuestas realizadas mediante la evolución observada en un caso de estudio práctico del procedimiento general y los específicos; debido a que el éxito definitivo puede estar condicionado a múltiples factores, así como, por la complejidad del objeto de estudio o por el periodo de tiempo necesario para constatar la transformación deseada.

Por su parte (Hernández Oro, 2015; Pérez Armas; Pérez Chacón, *et al.*, 2015; Cruz García; Carreón Guillén, *et al.*, 2016; Paez y Filion, 2017; Lucas Molina; Pérez Albéniz Iturriaga, *et al.*, 2017) definen la fiabilidad como el grado en que el instrumento produce resultados coherentes y consistentes, o sea, que las mediciones no varían bajo las mismas condiciones en diferentes espacios de tiempo. El análisis de la consistencia lógica del procedimiento propuesto se realiza mediante redes de Petri.

La validez se entiende como el grado en que el instrumento mide lo que se quiere medir (Muñiz, 1998; Gómez Benito y Dolores Hidalgo, 2015; Roncero, 2015; Cobos Aguilar, 2016; Lucas Molina; Pérez Albéniz Iturriaga, *et al.*, 2017; Tristán López y Pedraza Corpus, 2017). La valoración de la utilidad y factibilidad de uso del procedimiento se realiza mediante el cálculo del índice Iadov.

De esta forma, (Urrutia Egaña; Barrios Araya, *et al.*, 2014) plantea que la validez junto a la fiabilidad, determinan la calidad de un instrumento.

2.4.1. Análisis de la consistencia lógica del procedimiento con el uso de las redes de Petri

Los modelos de simulación han demostrado ser útiles para evaluar el rendimiento de diferentes configuraciones y/o procedimientos de operación alternativos para sistemas de producción. La simulación de procesos de negocio permite (Narciso *et al.*, 2010): evaluación de escenarios; comparación rápida de alternativas; evaluación de parámetros; conducción de procesos de reingeniería, evaluación de procesos de mejora continua. Asimismo, acelera el rendimiento en el aprendizaje, potencia el uso de mejores prácticas de negocio y disminuye los costos. Entre los enfoques de simulación tradicionales se encuentra la simulación orientada a procesos y a eventos, mientras que otras tendencias más actuales son la simulación orientada a objetos y los simuladores visuales (combinación de los anteriores). La tecnología de administración workflow busca ofrecer una solución flexible en apoyo a los procesos de negocio. Mientras tanto, la falta de definición bien formalizada, en lo que se refiere a síntesis y a semántica de estas técnicas, dificulta el análisis de los modelos más complejos (Medina Nogueira, 2016). En este sentido, las redes de Petri actúan con excelente potencial, una vez que se representan gráficamente (Dallavalle de Pádua *et al.*, 2004);

son de fácil aprendizaje, funcionan con lenguaje de comunicación entre especialistas de diversas áreas, permiten describir aspectos estáticos y dinámicos del sistema a representar y también poseen el formalismo matemático necesario para métodos de análisis ya consagrados. Mediante una red de Petri puede modelarse un sistema de evolución en paralelo o eventos concurrentes compuesto de varios procesos que cooperan para la realización de un objetivo común (Marranghello, 2005).

El uso de las redes de Petri, de acuerdo con Sáez Mosquera (2012), permite demostrar que un procedimiento es general, todos los estados están considerados; desde el inicio se puede alcanzar el fin; existe parsimonia (lo más simple posible); todos los estados críticos están considerados; hay aportes científicos en el procedimiento (compara grafos).

Una red de Petri es semánticamente válida (consistencia lógica):

1. Desde el punto de vista estructural:

- Implica que no hay operaciones mal conectadas.
- No existen violaciones de libre elección (starvation: XOR y luego en una de las ramas hay condiciones).
- Todos los estados y transiciones pertenecen a componentes fuertemente conexos.

2. Desde el punto de vista funcional:

- La reducción de ruido.

En el anexo 2.1 aparece la red de Petri, con el uso del software WoPeD (Workflow Petri net Designer). Con esta herramienta se demuestra que no hay inconsistencias en el diseño del procedimiento, que conduzcan a redundancias, o ejecución de tareas incoherentes entre sí.

2.4.2 Evaluación de la utilidad y la factibilidad de uso del procedimiento a través de la técnica ladov

La técnica de ladov, debe su nombre a su creador V. A. ladov. Según Filgueira Sainz de Rozas (2013) las investigaciones que la han utilizado, la describen como una herramienta efectiva para el estudio del nivel de satisfacción de los participantes en diversos contextos formativos. Consiste en tres (3) preguntas cerradas intercaladas en un cuestionario y cuya relación el encuestado desconoce². Su objetivo es la valoración del nivel de satisfacción, según el Cuadro Lógico de ladov.

La respuesta a estas tres preguntas permite ubicar a cada encuestado, según el cuadro lógico, en una escala de satisfacción, para luego calcular el Índice de Satisfacción Grupal (ISG), de acuerdo a la expresión (ecuación 2.6). La escala de

² En la mayoría de los casos para la elección de los encuestados, con fines de valoración de una propuesta en cuestión, es empleado el método de selección de expertos.

satisfacción establece una serie de: (1) clara satisfacción, (2) más satisfecho que insatisfecho, (3) no definida, (4) más insatisfecho que satisfecho, (5) clara insatisfacción, y (6) contradictoria.

$$\text{ISG} = A (+ 1) + B (+ 0,5) + C (0) + D (- 0,5) + E (- 1) (1) N \quad (2.6)$$

Donde: A, B, C, D, E, representan los encuestados con índice individual 1; 2; 3 ó 6; 4; 5 y N representa el número total de sujetos del grupo. Los valores del índice se encuentran entre -1 (mayor insatisfacción) y 1 (mejor satisfacción). Permite reconocer las categorías grupales siguientes (figura 2.6): Insatisfacción: desde (-1) hasta (-0,5) Contradictorio: desde (-0,49) hasta (+0,49) Satisfacción: desde (+0,5) hasta (1).



Figura 2.6. Rangos de valoración del ISG.

Fuente: Hernández (2010).

En el anexo 2.2 se muestran los resultados de la aplicación de la técnica ladov para valorar la utilidad y factibilidad de uso del procedimiento. El valor resultante del ISG es de 0,89; y según los rangos de las categorías grupales, se encuentra entre (+0,5) y (1), por tanto, refleja satisfacción y se interpreta como una valoración positiva.

2.5. Conclusiones parciales

Los resultados del diseño metodológico de esta investigación, se sintetizan en las conclusiones siguientes:

1. El instrumento metodológico propuesto, materializado en un modelo, un procedimiento general y tres procedimientos específicos propicia una herramienta para la evaluación de la gestión ambiental empresarial basada en índice sintético, el ISGAE, construido mediante técnicas de minería de datos.
2. El procedimiento propuesto posee la particularidad de insertarse como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones; por tanto, tributa a la mejora continua de las empresas, a la vez que alinea el proceso de gestión empresarial al logro de la estrategia ambiental.
3. El procedimiento general para la gestión de la evaluación ambiental empresarial se compone por tres fases y seis etapas, en las que se integran los procedimientos específicos asociados: el procedimiento para el levantamiento de la información inicial de la gestión ambiental empresarial, el procedimiento para la

construcción del ISGAE mediante minería de datos y el procedimiento para el pronóstico del comportamiento del ISGAE mediante minería de datos.

4. Un medidor sintético para la evaluación integrada de los indicadores ambientales a través de los procesos que cuantifica el nivel de desempeño de estos, permite obtener una descripción con enfoque holístico de la gestión ambiental en las empresas cubanas, toda vez que correlaciona un conjunto de indicadores de diferentes categorías.
5. La obtención de los indicadores ambientales y del ISGAE y sus pronósticos de comportamiento mediante el empleo de técnicas de minería de datos provee solidez y rigor a la información obtenida, ya que es derivada de la simulación y no de la subjetividad de los investigadores. Esto demuestra la necesidad de emplear algoritmos capaces de clasificar datos, sin la necesidad de conocer la clase a la que pertenece cada objeto de la muestra.
6. El empleo de una herramienta automatizada, como es el Observatorio Ambiental Costatenas, para el cálculo de los indicadores ambientales, del ISGAE y sus pronósticos, tributa a la integridad, consolidación y centralización de la información ambiental generada por las empresas; a la vez que facilita el manejo de la misma por parte de los gestores y coadyuva al proceso de toma de decisiones efectivas y rápidas.
7. Se comprobó la consistencia lógica y funcionalidad del procedimiento general, sin impedimentos estructurales, a través de su modelación por redes de Petri con el uso del software WoPeD, lo que aportó un carácter dinámico a su elaboración. La utilidad y factibilidad de uso, se probó mediante el comportamiento del Índice Iadov, con un Índice de Satisfacción Grupal de 0,89 (superior a 0.5), que refleja satisfacción y una valoración positiva.

CAPÍTULO 3: APLICACIÓN DEL INSTRUMENTO METODOLÓGICO PARA LA EVALUACIÓN DE LA GESTIÓN AMBIENTAL EMPRESARIAL BASADO EN ÍNDICE SINTÉTICO

El presente capítulo se desarrolla con el objetivo de validar el procedimiento general propuesto como comprobación de la hipótesis planteada. La validación se orienta tanto al plano teórico como práctico. Desde el punto de vista empírico, se realiza la aplicación práctica del procedimiento general, en función de los referentes teóricos y metodológicos abordados en los capítulos precedentes. Este proceso resume tres años de trabajo asociado a la Empresa Comercializadora de Combustible de Matanzas, como caso de estudio, en el período de 2018 a 2020. Para el desarrollo del capítulo se proponen los objetivos siguientes:

- Aplicar el instrumento metodológico para la evaluación de la gestión ambiental empresarial mediante la implementación del ISGAE en la Empresa Comercializadora de Combustible de Matanzas.
- Validar la hipótesis de investigación desde la comprobación de la contribución a la gestión ambiental empresarial, luego de la aplicación del ISGAE.

3.1. Comprobación de las premisas

Se procede a comprobar las premisas del modelo conceptual para la implementación del procedimiento general.

- Manifiesto interés de las empresas en la aplicación del procedimiento (Anexo 3.1.a). En la medida que aumentan la cantidad de empresas que implementan el ISGAE, aumenta el interés de otras por evaluar el desempeño de su gestión ambiental con el ISGAE. El empleo del OBSAM-Costatenas como herramienta para la implementación del ISGAE, facilita su generalización y acceso.
- Apoyo del Citma para la aplicación del procedimiento en las empresas (Anexo 3.1.b). Se cuenta con el total apoyo de la Delegación del Citma provincial para la implementación del ISGAE. Se incorpora el ISGAE a los resultados de proyectos internacionales coordinados por diferentes Agencias Ambientales.
- Correspondencia de la gestión ambiental de las empresas con el marco legal regulatorio de la gestión ambiental en Cuba. Existe una marcada correspondencia entre las políticas ambientales y la gestión ambiental. Los sistemas de gestión ambiental que actualmente se operan, consisten en procedimientos internos de manejo ambiental y han sido desarrollados por la industria para la industria, en respuesta de la creciente legislación ambiental y del aumento del interés público por los temas ambientales, se corroboraron los siguientes:

- Los Sistemas de Gestión Ambiental, mayormente basados en las Normas ISO 14.000.
- Evaluación de impacto ambiental.
- Planes de manejo enfocado en los recursos naturales y los productos peligrosos.
- Análisis de riesgo ambiental y planes de riesgo ambiental.
- Planes de contingencia.
- Monitoreos y actividades de ciencia, tecnología e innovación (CTI).
- Auditorías ambientales.
- Enfoque integral de dichos sistemas se proponen responder específicamente a:
 - Responsabilidad ambiental: se refiere a un manejo ambiental de los recursos naturales, que garantiza el uso adecuado y beneficios de manera permanente.
 - Responsabilidad social: implica una participación social directa en la planificación y toma de decisiones la organización.
 - Sustentabilidad económica: hace mención a una rentabilidad económica del negocio, que refleje sus beneficios hacia el ambiente y en las condiciones de vida de las comunidades con influencia de las actividades petroleras.
- Existencia de información estructurada (datos) sobre la gestión ambiental de las empresas donde se aplicará el procedimiento. La estructura de metadatos garantiza el cumplimiento de esta premisa.

3.2. Resultados de la implementación del procedimiento general para la determinación del ISGAE

Fase 1. Preparación para la implementación

La industria petrolera en particular realiza numerosos procesos que generan consecuencias directas sobre el ambiente, en especial emisiones atmosféricas, contaminación y desechos sólidos y peligrosos. Por lo que se hace necesaria la acción inmediata de iniciativas que contrarresten estos efectos.

Todas las empresas, que de una forma u otra intervienen en el proceso productivo-comercial de los hidrocarburos y sus derivados, están obligados a reforzar las medidas establecidas en cada una de ellas en cuanto a la protección medioambiental y de sus recursos humanos, puesto que en cada paso del proceso existen riesgos de contaminación que atentan contra el medioambiente y la calidad de vida de las personas que interactúan con estos productos.

Desde hace algunas décadas, la degradación ambiental y situaciones que desmejoran la calidad de vida de la población son preocupantes, los problemas socioeconómicos y ambientales amenazan la sostenibilidad del propio proceso de desarrollo de la humanidad, a mediano y largo plazo (León & Cárdenas, 2020).

Las consecuencias de los efectos negativos ocasionados por el manejo y utilización de los hidrocarburos y sus derivados en la actualidad resultan obvias. La contaminación de los mares, los ríos y los suelos, con incidencia en la pérdida de la flora y la fauna, resulta una problemática alarmante que resulta, en gran parte, consecuencia directa de la industria petrolera, ya sea en la extracción, procesamiento, transportación o distribución de las materias primas y los productos resultantes de la misma debido, entre otras causas, a la ocurrencia de derrames, mala manipulación y vertimientos.

Algunas de las situaciones problemáticas en el ámbito ambiental que se presentan en el sector petrolero de manera general son (Córdoba Durán, 2016):

- Contaminación de fuentes de aguas subterráneas.
- Manejo incorrecto de los fluidos y equipos de perforación.
- Fugas de oleoductos, tanques y pozos (Instalación incorrecta y mal mantenimiento).
- Liberación incontrolada de grandes volúmenes de petróleo.
- Partículas en la atmósfera debido a la alteración del suelo debido a las actividades de construcción y tráfico vehicular, además de la incineración de desechos y quema de gas.
- Emisión de hidrocarburos como el Metano (CH₄), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂), Óxidos de Nitrógeno (N_xO_y) y Sulfuro de Hidrógeno (H₂S) debido a fugas, derrames y desechos en la producción.
- Liberación incontrolada de gas, explosiones o incendios por reventón del pozo.
- Modificación de la topografía y eliminación de vegetación debido a la construcción de caminos, sitios de perforación e instalaciones de producción.
- Daño de áreas ecológicas frágiles, hábitats críticos de la fauna y especies amenazadas.

Se hace imprescindible destacar además otras consecuencias importantes como:

- Generación de aguas residuales durante actividades relacionadas con la explotación, además de la generada durante el mantenimiento y la limpieza de los equipos.
- Contaminación de fuentes hídricas por aceites, lodos y otros desechos.
- Enfermedades en especies y personas por inhalación de aire contaminado o consumo de aguas contaminadas.
- Pérdida de fertilidad en los suelos, que afecta las actividades relacionadas con la agricultura.
- Contaminación por goteo o derrames generados durante actividades tales como: transporte y operación de maquinaria.

- Generación de residuos sólidos y peligrosos.

Estas consecuencias reafirman la necesidad de una correcta gestión ambiental en las empresas de la industria petrolera, con el firme propósito de disminuir los efectos negativos de sus procesos y establecer un plan de recuperación del medioambiente.

En lo referente a entidades pertenecientes a la industria petrolera, se hace necesario el constante seguimiento y evaluación de la gestión ambiental, debido a los productos que son utilizados y los residuos que producen, considerados altamente contaminantes para el entorno (Vale Capdevilal & Pérez Silvall, 2016).

Etapa 1.1. Diagnóstico ambiental

En esta etapa de determinaron los indicadores ambientales existentes en la empresa y se construyen a partir de los datos almacenados, se verificó el cumplimiento de los requisitos prácticos de los indicadores, se definió su importancia y clasificación según la matriz P-E-I-R y se realizó el análisis de escenarios resultantes; finalmente, con la información capturada se elaboraron las fichas técnicas de los indicadores.

Categorías de los indicadores

El formato de presentación del contenido de los indicadores es uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta, ya que el éxito y el grado de comunicación que se pretende con ellos depende de la información que se suministre y de cómo se organice la misma. La función principal del indicador es la de informar de forma clara y eficaz. Por tanto, se hace necesario establecer un contenido mínimo indispensable para presentar los indicadores, ya que éstos son sometidos habitualmente a foros de discusión de diversa índole, tanto para procesos de selección de los propios indicadores como para el análisis y validación de la información que contienen. Esto exige disponer de información muy concreta y concisa sobre los mismos, con el fin de evitar ambigüedades en su interpretación. Existe gran variedad de posibles formatos de presentación de los indicadores, modificándose su contenido en función de la información que se pretende ofrecer. No obstante, la información básica a desarrollar puede ser el que se presenta a continuación, y que, por supuesto, debe sufrir las modificaciones oportunas en función de las necesidades y disponibilidad de información.

1. Descripción y ámbito del indicador:

- Definición del indicador.
- Objetivo para el que se plantea el indicador.
- Gráfico o diagrama que debe contener información sobre: años, unidades de medida, leyenda asociada, fuente de información y notas aclaratorias.

- Mensaje clave que describe sucintamente la conclusión que puede obtenerse del análisis de la información presentada en el gráfico y la tendencia ofrecida por el indicador.
 - Tipo de indicador, dentro del marco de referencia en el que se desarrolla el sistema al que pertenece.
 - Ámbito del indicador: cobertura geográfica y temporal.
2. Análisis y evaluación de la información ofrecida por el indicador:
- Definición del problema ambiental al que se refiere y relevancia del mismo para analizar el problema. Amplía el objetivo para el que se desarrolla el indicador presentado en punto 1.
 - Evaluación de la información ofrecida por el indicador en relación con el problema con el que se asocia.
3. Datos base:
- Presentación de la tabla de datos que permite la elaboración del gráfico inicial.
4. Datos complementarios e información técnica:
- Fuente de datos. Descripción de los datos. Cobertura geográfica y temporal de los datos básicos. Metodología y frecuencia de captura de datos. Metodología de tratamiento de datos. Análisis de las metodologías empleadas y posibilidad de comparación (cuando sean distintas).
 - Trabajos pendientes o futuros desarrollos que mejorarían la información.
 - Marco legislativo o normativa vinculada al indicador con especificación de valores límite.
 - Notas aclaratorias, observaciones, etc.

La necesidad de disponer de información sintética sobre el estado y la evolución del medioambiente, por encima de la mera recogida de datos y elaboración de estadísticas, ha derivado en el desarrollo de los indicadores ambientales como herramientas específicas de información. A ello ha contribuido también el hecho de que hoy en día, es relativamente sencillo disponer de abundante información y de datos estadísticos sobre temas ambientales, pero se detecta que, en muchas ocasiones se ha puesto un mayor esfuerzo en la recogida de la misma, que en su análisis y su adecuada presentación. Además, la información presentada bajo la forma de indicadores permitirá completar los informes periódicos sobre el estado del medioambiente, e incluso elaborarlos con una perspectiva totalmente diferente, lo que tributa a la supervisión de los progresos registrados en política medioambiental y a la integración de las directrices ambientales en las políticas sectoriales. De igual forma, esto hará posible revisar de forma regular y sistemática el progreso tendente al

cumplimiento de los objetivos políticos y a la comunicación de los resultados a los agentes interesados, con inclusión entre éstos al público en general. Estas y otras razones más técnicas han contribuido a la necesidad de elaborar un conjunto de indicadores que, estructurados en áreas temáticas específicas y representativas de la problemática ambiental, sean capaces de configurar un sistema coherente y dotado de la suficiente consistencia y lógica interna para asegurar su estabilidad.

La selección de los indicadores se ha realizado con la identificación de los principales problemas o preocupaciones ambientales asociadas a cada una de las áreas ambientales contempladas. De esta forma, se dispone de una visión de la problemática del medioambiente y de una forma de evaluación o seguimiento de la evolución de estos problemas mediante los indicadores adoptados.

El sistema propuesto presenta un esquema sencillo, fácil de desarrollar en nuevas áreas y responde a una organización analítica coherente con un enfoque basado en el seguimiento de objetivos de sostenibilidad. El esquema consta de cuatro áreas principales (cuadro 3.1), dividiéndose, a su vez, el área recursos naturales en cinco subáreas: 1. Atmósfera, 2. Residuos, 3. Industrias (empresas) y 4. Recursos Naturales (4.1. Biodiversidad, 4.2. Bosques, 4.3. Costas y Medio Marino, 4.4. Suelo y 4.5. Agua). El área 3, es donde se enclava el objeto de estudio práctico de la investigación, el resto de las áreas se analizan desde un enfoque de interrelación de sus componentes con la Empresa comercializadora de Combustibles de Matanzas.

Además de estas áreas ambientales propiamente dichas, la publicación contempla los principales sectores de actividad responsables de las presiones que se originan sobre el medioambiente, en correspondencia con la matriz P-E-I-R.

Los indicadores (Anexo 3.2) fueron seleccionados sobre la base de aplicar el Procedimiento para la jerarquización y/o reducción de los Indicadores Ambientales Ciclo 2016-2020 planteado en la Estrategia Ambiental Territorial, Provincia de Matanzas.

Cuadro 3.1. Sistema de indicadores desarrollados.

Área Ambiental	Tipo	Indicador
1. Atmósfera	E	Concentración de CO ₂
	E	PH medio anual en precipitación
	E	Concentración media anual de SO ₂
	E	Concentración media anual de NO ₂
	P	Emisiones anuales de CO ₂ por sector
	P	Emisiones anuales de CO ₂ por sector
	P	Emisiones de N ₂ O por sector
	P	Producción y consumo de sustancias que agotan la capa de ozono
	P	Emisiones de SO ₂ en fuentes fijas y móviles
	P	Emisiones de NO _x en fuentes fijas y móviles
	P	Emisiones de NH ₃
	P	Emisiones de COV no metánicos
	R	Intensidad energética
	R	Participación de las energías renovables y la cogeneración
R	Tasa de reducción de CFCs	
R	Esfuerzo en descontaminación en fuentes fijas	
2. Residuos	P	Producción de residuos peligrosos
	P	Producción de residuos per capita
	P	Residuos totales producidos por sector
	P	Consumo de envases de vidrio y plástico
	R	Tasa de recuperación de vidrio y papel-cartón
	R	Tasa de reciclado de materia orgánica en residuos
	R	Destino de los residuos
	R	Tasa de gestión de aceites usados
	R	Tasa de eliminación de PCB y PCT
	R	Residuos peligroso importados y exportados
3. Industria (empresas)	E	Niveles de inmisión de NO _x
	E	Niveles de inmisión de PM ₁₀
	E	Superficie de suelo vacante
	E	% construido según la superficie útil
	E	Emisiones de NO _x
	P	Emisiones de COVNM
	P	Fuerza laboral
	R	Gasto estatal en protección del medioambiente
	R	Gasto estatal en reducción del ruido
	R	Implantación de políticas e instrumentos ambientales
R	Gasto estatal en educación y formación ambiental	
4. Recursos Naturales		
4.1. Biodiversidad	R	Especies amenazadas sobre el total de especies
	P	Incremento de carreteras por unidad de superficie
	R	Espacios protegidos con Plan de Ordenación de

		Recursos Naturales
	R	Especies en peligro con Planes de recuperación
	R	Inversión en conservación
4.2. Bosques	E	Daños en la superficie boscosa
	E	Superficie arbolada
	P	Producción de madera
	P	Incendios forestales
	R	Repoblación forestal
	R	Superficie forestal protegida
4.3. Costas y medio marino	E	Costa con problemas de erosión
	E	Contaminación en puntos críticos
	P	Gestión portuaria
	P	Superficie de costa desnaturalizada
	P	Vertidos contaminantes desde las cuencas al mar
	R	Planes de Manejo Integrado de Zonas Costeras
	R	Espacios marinos de interés pesquero protegidos
	R	Arrecifes artificiales
4.4. Suelo	R	Capacidad de recogida de residuos oleosos de barcos
	E	Suelos afectados por la erosión
	E	Número de emplazamientos contaminados
	E	Superficie afectada por riesgo de desertificación
	P	Superficie incendiada
	P	Plaguicidas utilizados
	R	Superficie restaurada
	R	Superficie de suelo protegido por acuerdos de conservación
	R	Gasto público en descontaminación de suelos
	R	Gasto público en lucha contra la erosión
4.5. Agua	E	Acuíferos contaminados por nitratos
	E	Acuíferos costeros salinizados por intrusión marina
	E	Ríos con buena calidad según índices bióticos
	E	Embalses
	E	Especies piscícolas amenazadas o en extinción
	E	Sobreexplotación de acuíferos
	P	Intensidad de uso del agua
	P	Tratamiento de aguas residuales
	R	Gasto público en gestión de aguas residuales
	R	Cauces deslindados

Fuente: elaboración propia (aplicación de la metodología P-E-I-R en el levantamiento de los indicadores de la Empresa Comercializadora de Combustible de Matanzas).

De esta forma, el sistema cuenta con información sintética sobre la integración de consideraciones ambientales en las políticas institucionales, información que debería ser básica para la toma de decisiones relacionadas con la elaboración de dichas políticas. Los indicadores seleccionados están en consonancia con los Indicadores de la Comisión de Desarrollo Sostenible (CSD) 2001, por categorías, temas y subtemas, tal y como se resume en el informe de la Comisión Económica para América Latina (CEPAL, 2004).

Fase 2. Gestión ambiental empresarial

Se implementaron las herramientas de gestión según los requerimientos del desarrollo de la gestión ambiental en la empresa, que constituyen la base organizacional de soporte al manejo ambiental. Se construyó el sistema de control del modelo, a partir del análisis del ISGAE resultantes del procesamiento de los indicadores obtenidos en el diagnóstico de la fase anterior. Finalmente, se realizó un análisis predictivo del comportamiento del ISGAE.

Etapas 2.1. Determinación de los indicadores ambientales

Se analizó y procesó la información obtenida de la Fase 1, de modo que se construyó el ISGAE a partir de la relación existente en el conjunto de datos, ya sean indicadores o parámetros. A partir de la integración y recopilación de los datos almacenados previamente en la base de datos, se procedió a la selección, limpieza y transformación de los mismos, lo que derivó en serie de datos seleccionados o vista minable.

- La realidad fenoménica se manifiesta como un conjunto de interacciones propias de las partes que lo componen ya sean estos observables o de forma latente.
- En general los fenómenos ambientales pueden ser descritos por la interacción de un conjunto de variables, en este caso se dice que, esta descrito por una variable compleja, es decir que su descripción está en función de muchas variables, y estas a su vez por una batería de indicadores simples.
- Al momento de proponer la construcción del ISGAE, debe tenerse claro qué variable compleja (fenómeno a describir) es la que pretende medir.
- La batería de indicadores debe responder al marco teórico, asociado a dicha variable compleja.
- Los indicadores deben ser lo más variados posibles, en función de la información disponible, para reflejar todas las aristas del fenómeno a describir y deben estar estandarizados y normalizados de modo que se pueda realizar análisis de correlaciones y determinar clústeres a partir de la clasificación.

Clasificación del ISGAE

Selección de los datos

Se seleccionó el conjunto de datos, tanto en lo referido a las variables objetivo (aquellas que se quiere predecir o clasificar), como a las variables independientes (las que sirven para hacer el cálculo o proceso). A partir de la aplicación del método Hold Out.

La recopilación y el preprocesamiento en Machine Learning, tuvo una influencia absoluta en el ajuste del procedimiento y su desempeño. Cuanto más y mejores fueron los datos obtenidos, mejor fue el rendimiento del procedimiento. Las fuentes de los datos fueron diversas: archivos .csv, hojas de cálculo, páginas webs, bases de datos, entre otros. Por tanto, se aplicaron disímiles técnicas para su recopilación.

Normalización de los datos

La reducción de la dimensión de los datos en el orden de las variables, resulta ser especialmente útil ya que permite agruparlas de manera robusta, y al mismo tiempo garantiza que los componentes (agrupaciones encontradas, denominadas también variables latentes) sean incorrelacionados, es decir por un lado las variables originales representadas en cada componente guardan la máxima correlación entre ellas, pero las variables latentes resultan ser excluyentes entre sí.

Para comenzar a entrenar los algoritmos fue necesario transformar los datos a partir de la normalización de sus atributos (figura 3.1) de forma tal que sus valores estuvieran en un rango entre 0 y 1. Los datos fueron transformados a una estructura data frame para hacer posible su manipulación en el lenguaje R. Una vez realizado el preprocesamiento de los datos, estos quedaron normalizados y en formato data frame, para su uso en la construcción del procedimiento.

Una de las ideas centrales detrás de la construcción del ISGAE, corresponde a medir el estado de la variable compleja, en ese sentido la correlación entre los indicadores debe quedar totalmente identificada a priori. Existen distintas formas de realizar la normalización, pero la más utilizada corresponde a las distancias relativas (ecuaciones 3.1 y 3.2):

Relación directa:

$$I_{ij}^{dir} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (3.1)$$

Relación inversa:

$$I_{ij}^{inv} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (3.2)$$

De esta forma, se garantiza un recorrido de los valores estandarizados x_{ij} entre 0 y 1, de forma que, cuanto más se aproxime a 1 dicho valor, mayor será la presencia del fenómeno estudiado en el elemento j .

	Sepal.Length	Sepal.Width	Petal.Length	Petal.Width
1	0.6410256	0.4358974	0.1666667	0.01282051
2	0.6153846	0.3717949	0.1666667	0.01282051
3	0.5897436	0.3974359	0.1538462	0.01282051
4	0.5769231	0.3846154	0.1794872	0.01282051
5	0.6282051	0.4487179	0.1666667	0.01282051
6	0.6794872	0.4871795	0.2051282	0.03846154
7	0.5769231	0.4230769	0.1666667	0.02564103
8	0.6282051	0.4230769	0.1794872	0.01282051
9	0.5512821	0.3589744	0.1666667	0.01282051
10	0.6153846	0.3846154	0.1794872	0.00000000
11	0.6794872	0.4615385	0.1794872	0.01282051
12	0.6025641	0.4230769	0.1923077	0.01282051
13	0.6025641	0.3717949	0.1666667	0.00000000
14	0.5384615	0.3717949	0.1282051	0.00000000
15	0.7307692	0.5000000	0.1410256	0.01282051
16	0.7179487	0.5512821	0.1794872	0.03846154
17	0.6794872	0.4871795	0.1538462	0.03846154
18	0.6410256	0.4358974	0.1666667	0.02564103
19	0.7179487	0.4743590	0.2051282	0.02564103
20	0.6410256	0.4743590	0.1794872	0.02564103

Figura 3.1. Datos normalizados con estructura data frame (primeras 20 observaciones).

Fuente: elaboración propia.

Separación del conjunto de datos de prueba y el conjunto de datos de entrenamiento

Se dividió el conjunto de datos mediante el empleo del método hold out.

Selección de las técnicas de minería de datos a emplear

Se seleccionaron las técnicas de minería de datos y se diseñó el procedimiento predictivo y de clasificación, mediante la aplicación de los métodos Análisis de Componentes Principales (PCA), Árboles de Decisión, Random Forest, y Receiver Operating Characteristic (ROC).

- Análisis de Componentes Principales (PCA)

Para reducir la dimensionalidad del conjunto de datos, se transformó el conjunto de variables originales en otro conjunto de variables correlacionadas llamadas componentes principales. Se tomó el 70 % de los datos para el proceso de entrenamiento y validación, y el 30 % restante exclusivamente para pruebas. Para el cálculo de los componentes principales se empleó únicamente el conjunto de entrenamiento, a partir de esto se definió la matriz de transformación que posteriormente será aplicada a los datos de prueba. Con esta técnica se evitó el sobreajuste del procedimiento, pues PCA busca las correlaciones entre

características, donde esta correlación implica que hay redundancia en los datos. Los pasos a seguir para la aplicación del PCA a la construcción del ISGAE se muestran en (Anexo 3.3) y se resumen en:

1. Se parte de un conjunto de variables (indicadores ambientales) que conceptualmente responden al modelo de explicación de la variable latente (ISGAE).
2. Se analizan los datos para determinar si se emplea el análisis de varianzas, covarianzas o correlaciones, en dependencia del grado de homogeneidad de la escala en que se encuentran los datos de la variable respuesta (ISGAE).
3. Se prueba la independencia de las variables, es decir, se prueba si son variables no correlacionadas, en cuyo caso ACP no opera (figura 3.2).
4. Determinar si existen datos ausentes y definir un procedimiento a emplear para su tratamiento (para este estudio, se emplea ponderación por valores adyacentes).
5. Modelar los datos en RStudio, para obtener los componentes principales y el conjunto de estimaciones que permitirán probar la consistencia de los resultados.

Los indicadores detectados en la fase 1, que caracterizan la gestión ambiental de las empresas, se abordaron en la construcción del ISGAE como variables complejas, donde: X1= atmosfera, X2= residuos, X3= industria, X4= biodiversidad, X5= bosques, X6= costas y medio marino, X7= suelo y X8= agua. Se obtuvieron las variables estandarizadas para mediciones de los últimos seis años (tabla 3.1).

Tabla 3.1. Variables estandarizadas

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
-1.86	-0.10	1.59	0.61	0.41	-0.37	1.51	1.34
1.66	0.63	0.23	-0.62	-0.43	-0.60	-0.43	0.02
0.57	0.92	0.02	-1.02	-0.57	-0.79	-0.96	-0.73
0.39	0.19	1.65	-0.84	-0.15	-0.82	1.44	2.09
1.21	-0.10	-1.39	-0.48	-0.98	-0.63	-0.94	-0.73
-0.25	1.36	0.13	1.53	-0.70	-0.73	-0.39	-0.54

Fuente: elaboración propia (salida de RStudio).

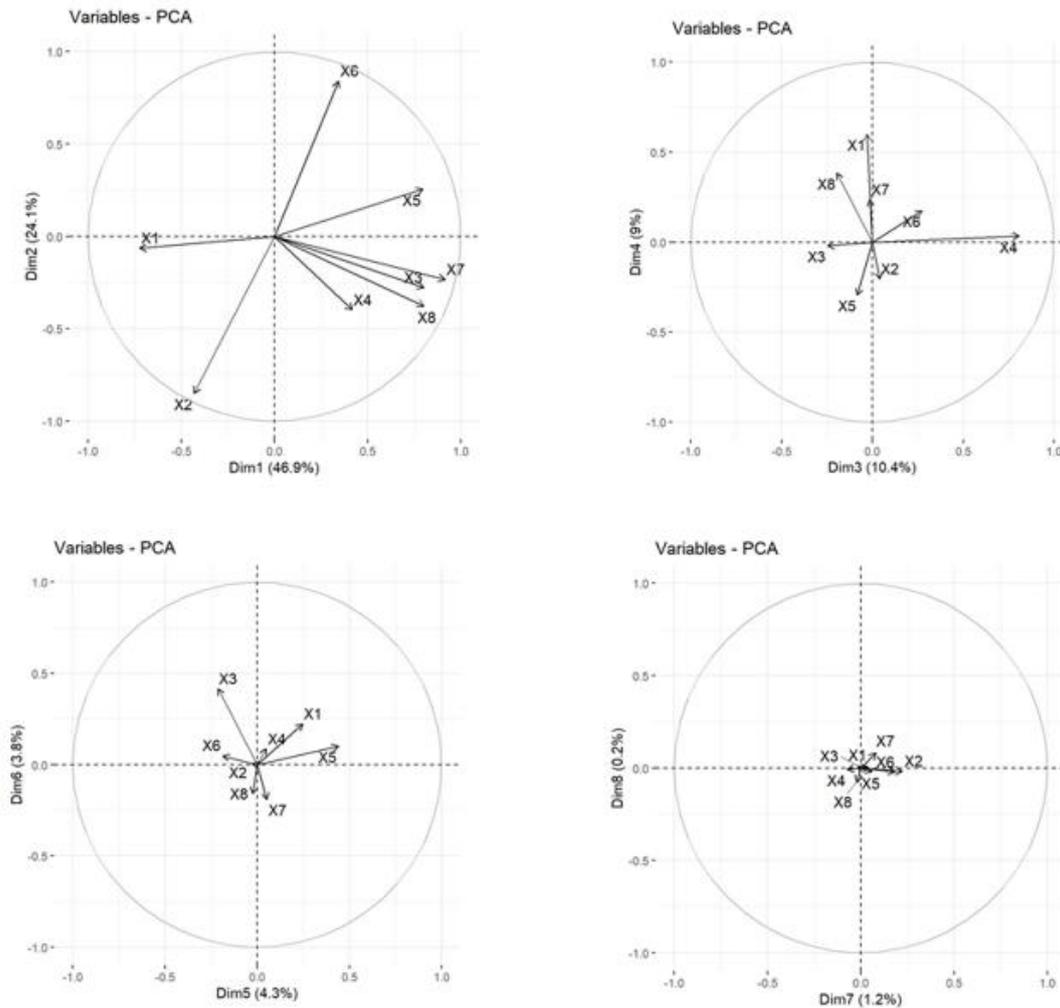


Figura 3.2. Correlaciones en los ejes de los componentes.

Fuente: elaboración propia (salida de RStudio).

- Árboles de decisión

Las condiciones son organizadas de forma jerárquica, a modo de árbol y a cada nodo no terminal del árbol se asocia un atributo y este a su vez a una condición, que determina cuáles datos de la muestra entran en cada rama, de tal manera que la decisión final se puede determinar a partir de las condiciones que se cumplen desde la raíz del árbol hasta algunas de sus hojas, lo que permite una fácil interpretación.

- Random Forest

En la fase de aprendizaje se crearon muchos árboles de decisión independientes, construyéndolos a partir de datos de entrada ligeramente distintos. Se alteró, por tanto, el conjunto inicial de partida, a partir de lo siguiente:

- Se seleccionó aleatoriamente con reemplazamiento un porcentaje de datos de la muestra total. Se incluyó un segundo nivel aleatoriedad, en el que se afectaron los atributos.

- En cada nodo, al seleccionar la partición óptima, se consideró sólo una porción de los atributos, elegidos al azar en cada ocasión. Una vez que se generaron muchos árboles, la fase de clasificación se llevó a cabo de la siguiente forma: cada árbol se evaluó de forma independiente y la predicción del bosque fue el voto mayoritario sobre todos los árboles del bosque, es decir la clase con mayor voto.

ROC (Receiver Operating Characteristic)

Cada resultado de predicción representó un punto en el espacio ROC. El mejor método posible de predicción se situó en un punto en la esquina superior izquierda, o coordenada (0,1) del espacio ROC, considerándose un 100% de sensibilidad (ningún falso negativo) y un 100% también de especificidad (ningún falso positivo). Una clasificación totalmente aleatoria marcó un punto a lo largo de la línea diagonal, línea de no-discriminación. En definitiva, se considera un procedimiento inútil, cuando la curva ROC recorre la diagonal positiva del gráfico.

Transformación de los datos en una serie temporal

Se analizaron las propiedades de los datos, en especial los histogramas, diagramas de dispersión, presencia de valores atípicos y ausencia de datos (valores nulos). Se transformó el conjunto de datos de entrada con el objetivo de prepararlo para aplicar la técnica de minería de datos que mejor se adaptó a los datos y al problema. A partir de la aplicación de los métodos Series Temporales, Descomposición estacional, Dickey-Fuller aumentada, Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin, Phillips-Perron.

El empleo de series temporales en R se basó en la librería *tseries*, la cual proporcionó una gran cantidad de pruebas y funciones estadísticas que posibilitaron la implementación de un procedimiento predictivo.

La función *ts* se empleó para crear objetos de series temporales. Estos son vectores o matrices con una clase de "ts" (y atributos adicionales) que representan datos que se han muestreado en puntos equiespaciados en el tiempo. En el caso de la matriz, cada columna de los datos de la matriz contiene una única serie de tiempo (univariante). Las series de tiempo tienen al menos una observación, y aunque no necesitan ser numéricas, se empleó un soporte muy limitado para las series no numéricas. El valor de la frecuencia del argumento se usó cuando la serie se muestreó un número entero de veces en cada intervalo de unidad de tiempo. Por ejemplo, se empleó un valor de siete para la frecuencia cuando los datos se muestrearon diariamente, y el período de tiempo natural fue una semana, o 12 cuando los datos se muestrearon mensualmente y el período de tiempo natural fue un año. Se supone que los valores de 4 y 12 en (por ejemplo) métodos de impresión implican una serie trimestral y mensual, respectivamente.

Para la transformación de los datos se construyó la función, *serieTemporal (datos, frecuencia)*, los parámetros de esta función fueron los datos que se transformaron y la frecuencia con la que fueron medidos.

En esta función se ordenaron las mediciones cronológicamente de manera ascendente y se tomó el año de la primera medición para dar inicio a la serie temporal. Plantear la fecha final de la muestra no es necesario cuando esta está en constante crecimiento, según la cantidad de datos proporcionados por la base de datos se calcula la fecha final a partir de la inicial.

El gráfico que se empleó para representar las series temporales fue el de secuencia. Estos son diagramas de líneas en los cuales el tiempo se representa en el eje de abscisas (x), y la variable cuya evolución en el tiempo es estudiada en el eje de ordenadas (y). Para diagramas de dispersión simples, se usó *plot*. Sin embargo, existen métodos de trazado para muchos objetos R, incluidas funciones, marcos de datos y objetos de densidad. Esta función tiene un comportamiento especial, pues en función del tipo de dato que se definen como argumento, generará diferentes tipos de gráfica. Para cada tipo de gráfico, fue posible ajustar diferentes parámetros que controlan su aspecto, dentro de esta misma función. *plot()* siempre pide un argumento *x*, que corresponde al eje *X* de una gráfica. *x* requiere un vector y si no se especifica este argumento, se obtiene un error y no se creará una gráfica. El argumento más importante de *plot()* es *y*, el resto son opcionales. Este argumento también requiere un vector *y* corresponde al eje *y* de la gráfica.

Si todas las variables aleatorias que componen el proceso están idénticamente distribuidas, independientemente del momento del tiempo en que se estudie el proceso, entonces la serie es estacionaria. Es decir, la función de distribución de probabilidad de cualquier conjunto de *k* variables (donde *k* un número finito) del proceso debe mantenerse estable (inalterable) al desplazar las variables *s* períodos de tiempo, tal que, si $P(Y_{t+1}, Y_{t+2}, \dots, Y_{t+k})$ es la función de distribución acumulada de probabilidad (ecuación 3.3):

$$P(Y_{t+1}, Y_{t+2}, \dots, Y_{t+k}) = P(Y_{t+1+s}, Y_{t+2+s}, \dots, Y_{t+k+s}), \quad \forall t, k, s. \quad (3.3)$$

Sin embargo, la versión estricta de la estacionariedad de un proceso suele ser excesivamente restrictiva para las necesidades prácticas. Por lo anterior, se empleó un concepto menos exigente. El de estacionariedad en sentido débil o de segundo orden que se da cuando la media del proceso es constante e independiente del tiempo, la varianza es finita y constante, y el valor de la covarianza entre dos periodos depende únicamente de la distancia o desfase entre ellos, sin importar el momento del tiempo en el cual se calculan.

Una serie puede ser no estacionaria por una variación en la media, una variación en la varianza o por la presencia de estacionalidad. Esto significa que si existe alguno de estos casos es necesario aplicar transformaciones en la serie.

Para el análisis de las series temporales se construyeron las funciones estacionalidad (serie, frecuencia) y estacionariedad (serie, frecuencia). Estas funciones contuvieron las principales pruebas que se realizaron a las series para conocer su composición.

- Método de descomposición

Primero, se determinó cómo se combinan los componentes de la serie estacional. Se emplearon las combinaciones aditiva y multiplicativa. Se dice que hay presencia de una aditiva cuando a pesar del crecimiento de la tendencia, la varianza y la media se mantienen estáticas, en cambio las multiplicativas son cuando la varianza y la media varían en consecuencia de la tendencia. En una serie temporal X_t es una función que depende de cuatro componentes (ecuaciones 3.4 y 3.5):

$$\text{Componentes aditivas: } X_t = C_t + T_t + S_t + E_t \quad (3.4)$$

$$\text{Componentes Multiplicativas: } X_t = C_t * T_t * S_t * E_t \quad (3.5)$$

Donde:

- Tendencia (T_t),
- Ciclo (C_t),
- Componente estacional (S_t),
- Componente irregular o ruido (E_t).

R cuenta con la librería *forecast* y esta a su vez con un método *decompose* que permite la descomposición del gráfico para su análisis visual, para la aplicación de este método es necesario que los datos tengan una frecuencia mínima dos.

En caso de que la frecuencia de los datos sea menor que dos, al análisis debe realizarse por el método matemático. Para este objetivo es necesario realizar pruebas de presencia de raíz unitaria, dado que en caso afirmativo esto implicaría la no estacionariedad y viceversa.

Se empleó la librería *forecast* de R y esta a su vez con un método *decompose* que permitió la descomposición del gráfico para su análisis visual, para la aplicación de este método se procesaron los datos con una frecuencia mínima dos. En caso de los datos con frecuencia menor que dos, se realizó el análisis por el método matemático, se realizaron pruebas de presencia de raíz unitaria, dado que en caso afirmativo esto implica la no estacionariedad y viceversa.

Las pruebas empleadas para este fin fueron:

- Prueba de Dickey-Fuller aumentada (ADF), es una versión aumentada de la prueba Dickey-Fuller para un conjunto más amplio y más complejo de

procedimientos de series de tiempo. La estadística Dickey-Fuller Aumentada (ADF), utilizada en la prueba, fue un número negativo. Cuanto más negativo fuera el número seleccionado, más fuerte fue el rechazo de la hipótesis nula de que existe una raíz unitaria para un cierto nivel de confianza. Para la realización de esta prueba, se empleó la librería *tseries* que cuenta con esta prueba estadística cuya función se llama *adf.test*.

- Prueba de Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin, en base a su hipótesis nula de que no posee raíz unitaria. La función empleada fue *kpss.test*.
- Prueba de Phillips-Perron, cuya hipótesis nula es que posee raíz unitaria. Se basa en la prueba de Dickey-Fuller. Al igual que la prueba de Dickey-Fuller aumentada, la prueba de Phillips-Perron aborda la cuestión de que el proceso de generación de datos podría tener un orden superior de autocorrelación que es admitido en la ecuación de prueba. Mientras que la prueba de Dickey-Fuller aumentada aborda esta cuestión mediante la introducción de retardos de como variables independientes en la ecuación de la prueba, la prueba de Phillips-Perron hace una corrección no paramétrica a la estadística *t-test*. El ensayo es robusto con respecto a la autocorrelación y heterocedasticidad en el proceso de alteración de la ecuación de prueba. La función empleada en *tseries* fue *pp.test*.

Para crear un clasificador, el algoritmo analizó primero los datos proporcionados, en busca de tipos específicos de patrones o tendencias. El algoritmo usó los resultados de este análisis en un gran número de iteraciones para determinar los parámetros óptimos para crear el procedimiento de minería de datos. A continuación, estos parámetros se aplicaron en todo el conjunto de datos para extraer patrones procesables y estadísticas detalladas.

El procedimiento de minería de datos empleado para crear el algoritmo a partir de los datos tomó diversas formas, que incluyeron:

- Un conjunto de clústeres que describió cómo se relacionan los casos de un conjunto de datos.
- Un árbol de decisión que predijo un resultado y que describió cómo afectan a este los distintos criterios.
- Un conjunto de reglas que describieron cómo se agrupaban los datos.

Una vez obtenido el conjunto de datos apto para iniciar el proceso de selección de la técnica de Machine Learning que se empleó para desarrollar el clasificador de indicadores, objeto de esta investigación, se realizó un análisis que consideró el número de variables y el número de ejemplos recolectados.

Cuando el conjunto de datos obtuvo una alta dimensionalidad, posee más de 10 variables o atributos, se puede comprometer la eficiencia del clasificador escogido por

tener un procedimiento con una complejidad alta que podría llevar a un overfitting (sobreajuste). Se puede correr el riesgo de tener atributos ruidosos que pueden tener el mismo peso que los atributos relevantes. En los casos en los que se trabajó con datos de alta dimensionalidad se aplicaron técnicas para la reducción de la misma, tales como: PCA, con el fin de seleccionar los atributos que recojan más información, y tener una descripción de los datos a un menor costo.

Se interpretaron y evaluaron los datos, una vez obtenido el procedimiento, se procedió a su validación para comprobar que las conclusiones que arrojó fueron válidas y suficientemente satisfactorias. En el caso de haber obtenido varios procedimientos mediante el uso de distintas técnicas, se compararon los procedimientos en busca de aquel que se ajustara mejor al problema.

Una vez realizada la lectura y particionamiento de los datos, estos fueron sometidos a un proceso de entrenamiento, validación y prueba.

El primero de los posibles procedimientos de clasificación estuvo basado en los árboles de decisión. Para ello se empleó la librería *rpart* y se creó un procedimiento a partir de la función *rpart* de dicha librería donde se declararon los atributos que fueron variables objetivo del procedimiento.

El resultado obtenido fue un árbol con un nodo raíz de 105 ítems. En la primera bifurcación se controla que la longitud del pétalo sea menor que 2.5 de modo que queden a un lado 36 casos y al otro 69. El árbol continuó ramificándose, y así hasta llegar a los nodos hojas (figura 3.3).

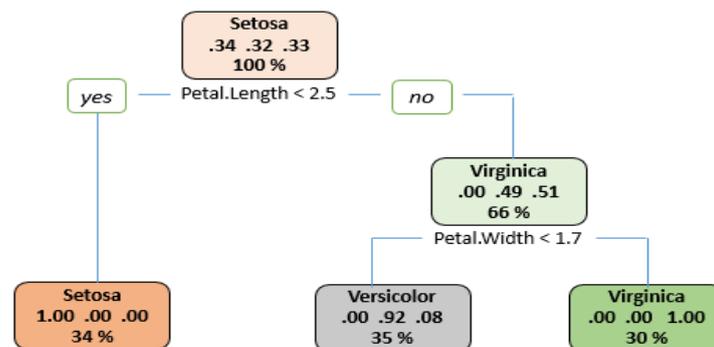


Figura 3.3. Gráfico del árbol de decisión generado.

Fuente: elaboración propia (salida de RStudio).

Con el set de prueba se generó un vector con los valores predichos por el procedimiento entrenado. Se cruzó la predicción con los datos reales del set de prueba para generar una matriz de confusión.

Determinación del ISGAE

Constituye la agregación (preferiblemente ponderada) de la batería de indicadores para la construcción de métricas que resumen el comportamiento de la variable compleja (ecuación 3.6).

$$ISGAI_i = \sum_{j=1}^m w_{ij} * F_{ij} \quad (3.6)$$

donde:

w_{ij} son los ponderadores, que son generados mediante técnicas multivariantes previstas en los paquetes de RStudio.

F_{ij} representa los factores o variables latentes formadas por la batería de indicadores, de apego al marco teórico de la variable compleja, la agrupación se indica por el método de agregación, se asume que m es la cantidad de factores presentes en el ISGAE que ha sido construido con k indicadores (figura 3.4).

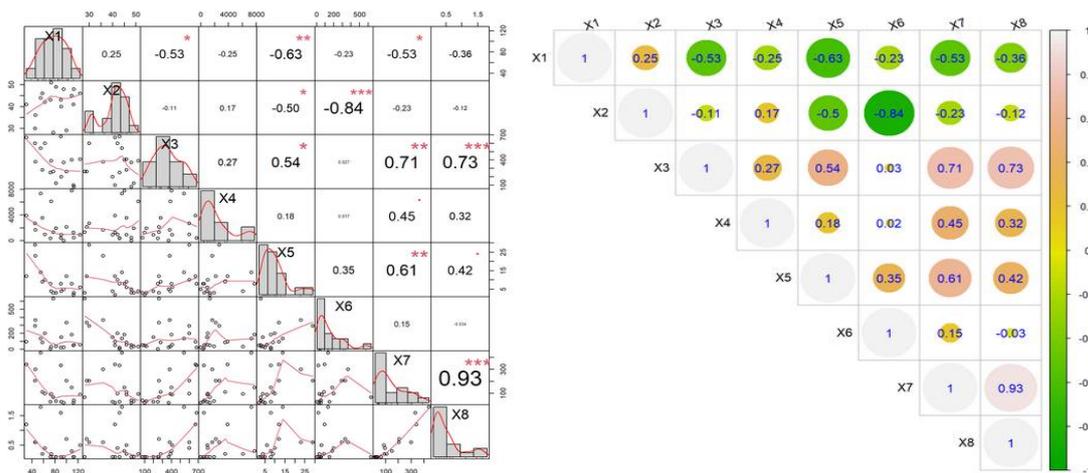


Figura 3.4. Correlaciones entre las variables de los indicadores.

Fuente: elaboración propia (salida de RStudio).

Tabla 3.2. Escala Hedónica.

Clasificación	Escala
Muy bueno	(0.80-1.00)
Bueno	(0.60-0.79)
Regular	(0.40-0.59)
Malo	(0.20-0.39)
Muy malo	(0.00-0.19)

Fuente: Nogueira, (2009).

Según la ecuación 3.6 para la determinación del ISGAE, se obtuvo que el valor promedio del mismo para el período 2016-2021 en la Empresa Comercializadora de

Combustibles de Matanzas es de 0.54. Se utiliza una escala de valoración (escala Hedónica) para determinar en qué estado se encuentra dicha empresa (tabla 3.2), se obtuvo que la situación de la gestión ambiental evaluada mediante el ISGAE es regular (figura 3.5).



Figura 3.5. Evaluación del ISGAE en la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas

Fuente: elaboración propia.

Pronóstico del comportamiento del ISGAE

Construcción del dataset

Fueron seleccionados para el entrenamiento de los modelos los datos del Centro de Análisis de Información, División de Ciencias Ambientales del Laboratorio Nacional de Oak Ridge (Tennessee, Estados Unidos). Esta base de datos posee información de indicadores ambientales de Cuba desde 1901.

La exploración de los datos se inició con una muestra de mediciones del parámetro temperatura, compuesta por 12 valores por año (tabla 3.3) y se emplearon datos de los años 1901 hasta 2020, una por cada mes de cada año. En los casos de valores (mediciones) nulas o con errores se ponderaron las medidas anterior y posterior para determinar el valor faltante.

Tabla 3.3. Muestra de los datos (ejemplo para un año específico).

Año	Mes	Medición
1901	Enero	21.3934
1901	Febrero	21.3323
1901	Marzo	22.6022
1901	Abril	22.7852
1901	Mayo	24.909
1901	Junio	26.673
1901	Julio	26.8807
1901	Agosto	26.8042
1901	Septiembre	26.8741
1901	Octubre	26.015
1901	Noviembre	21.8677
1901	Diciembre	21.5215

Fuente: elaboración propia.

Estadísticamente se cuenta con variables cuantitativas continuas, que arrojan valores mínimo, máximo y promedio, que permiten determinar las medidas de dispersión, desviación media, varianza y desviación típica.

Normalización del dataset

El dataset se convierte en una serie temporal con el objetivo de convertir los datos en valores procesables por los modelos de análisis y predicción. En R la serie temporal es expresada con un mínimo de dos vectores, uno para la fecha y el resto para los valores de la variable estudiadas. El software utilizado ofrece facilidades para esta conversión, a partir de la especificación de los datos, la frecuencia de medición y la fecha de inicio podemos obtener la serie temporal correspondiente. Se define como la serie de observaciones de una o más variables en el tiempo. Resalta la importancia del tiempo como dimensión en esta área, dado que los eventos pasados pueden influir en los futuros. Una vez conformada la serie temporal en R, la forma más sencilla de comenzar fue mediante su representación en un gráfico de secuencia (figura 3.6).

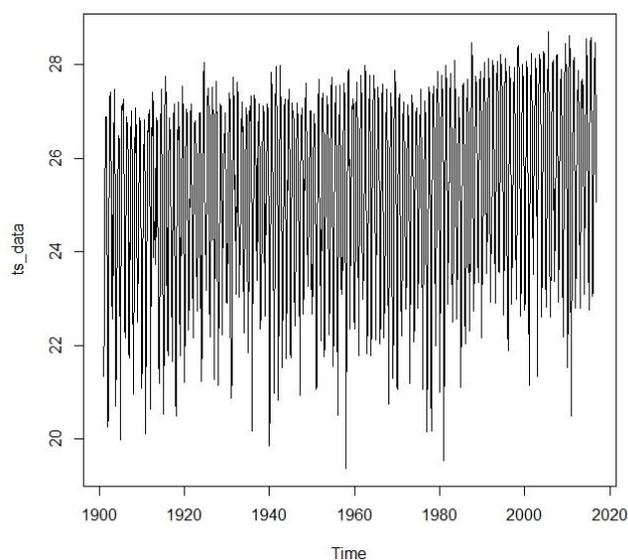


Figura 3.6. Gráfico de secuencia.

Fuente: elaboración propia.

Método de descomposición

Para aplicar un modelo ARIMA ajustado fue necesaria la transformación de la serie temporal en otra que fuera aproximadamente estacionaria. Para esto se emplearon técnicas como la diferenciación y logaritmos en dependencia de la no estacionariedad. A pesar que R cuenta con una librería llamada *forecast* y que permite la descomposición del gráfico para su análisis visual, se aplicó el método matemático que depende menos del error humano. Para este objetivo fue necesario realizar pruebas de presencia de raíz unitaria, porque en caso afirmativo esto implicaría la no estacionariedad.

Las pruebas estadísticas utilizadas (tabla 3.4), fueron Dickey-Fuller Aumentada, Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin, Phillips-Perron que demuestran la presencia de raíz unitaria, lo cual implica no estacionariedad.

Tabla 3.4. Resultados de pruebas estadísticas en la serie original.

Prueba	Resultado (valor p)	Según la hipótesis nula
Dickey-Fuller Aumentada	< 0.01	estacionaria
Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin	< 0.01	no estacionaria
Phillips-Perron	< 0.01	no estacionaria

Fuente: elaboración propia.

Por las pruebas estadísticas aplicadas la serie tiene características no estacionarias y se planteó la necesidad de su transformación. La no estacionariedad en media, se puede eliminar al aplicar una diferenciación a la serie temporal.

Obtenida la serie transformada, se aplicaron nuevamente las pruebas estadísticas para conocer los valores de la nueva serie (tabla 3.5).

Tabla 3.5. Resultados de pruebas estadísticas en la serie transformada.

Prueba	Resultado (valor p)	Según la hipótesis nula
Dickey-Fuller Aumentada	< 0.01	estacionaria
Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin	> 0.1	estacionaria
Phillips-Perron	< 0.01	no estacionaria

Fuente: elaboración propia.

La mayoría de los test aplicados demostraron estacionariedad excepto en el caso de Philips-Perron, cuando esto sucede se podría estar en presencia de una ruptura estructural, lo cual implica falsos reportes de no estacionariedad. Para conocer esto se aplicó la prueba de Zivot y Andrews que permitió además de conocer si una serie poseía raíz unitaria, saber si tenía ruptura estructural y en qué punto de esta existía. El resultado de esta última prueba arrojó la estacionariedad de la serie y la presencia de un cambio estructural en la misma.

Se graficó la serie transformada (figura 3.7) y se observa cómo se eliminó la variación en media y se muestra una serie estacionaria.

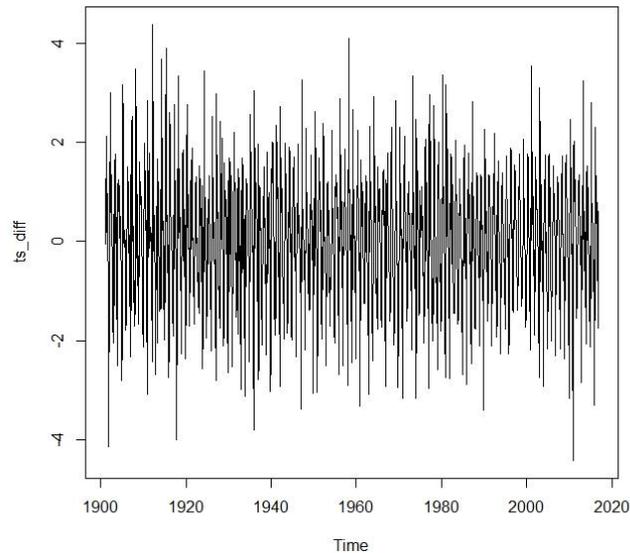


Figura 3.7. Gráfico de secuencia de la serie transformada.

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se analizó la estacionalidad de la serie, si esta poseía una frecuencia superior a una medición por año. Si hay presencia de esta, significa que las estaciones influyen directamente en el valor de la variable. Este tipo de modelos ARIMA en los que las variaciones en el tiempo influyen en la estacionalidad son conocidos como SARIMA. También pueden verse como $ARIMA(p,d, q)(P,D,Q)h$. En el modelo, la primera parte (p,d,q) expresa la parte no estacional del modelo (donde p es del orden autorregresivo AR, d es del orden de la integración y q es del orden de la media móvil MA). La otra parte $(P,D,Q)h$ identifica el orden de la posible estacionalidad en la serie de tiempo ($h = período$).

Para evaluar la estacionalidad en la serie se emplearon las siguientes pruebas: prueba de raíz unitaria de Osborn, Chui, Smith y Birchenhall; prueba de raíz unitaria de Hylleberg, Engle, Granger y Yoo y la Prueba de raíz unitaria de Canova y Hansen.

El paquete de R, *forecast*, contiene una función llamada *nsdiffs()*. Esta función analiza las pruebas mencionadas anteriormente y devuelve un número igual a la cantidad de diferenciaciones en la parte estacional que serán necesarias para que la serie deje de ser estacional, en caso que la serie sea no estacional devuelve 0.

Cuando se aplicó esta función, la devolución del software fue 1, por tanto, fue necesaria una diferenciación en la parte estacional. Se aplicó un modelo de regresión automática (ARIMA) donde $Y(t)$ depende solo de sus propios retrasos. Se definió el modelo ARIMA mediante las series de tiempo que se diferenciaron al menos una vez (ecuación 3.7), para convertirlo en estacionario:

$$\begin{aligned}
 Y_t = & \alpha + \beta_1 Y_{t-1} + \beta_2 Y_{t-2} + \dots + \beta_p Y_{t-p} \\
 & - p + \epsilon_t + \Phi_1 \epsilon_{t-1} + \Phi_2 \epsilon_{t-2} + \dots + \Phi_q \epsilon_{t-q} \quad (3.7)
 \end{aligned}$$

Como la serie temporal presentó una tendencia, lo primero fue aplicar una diferenciación, de orden d . Una vez diferenciada la serie, se compararon los correlogramas de la función de autocorrelación (ACF) y la función de autocorrelación parcial (ACFP), proceso que arrojó orientación para la formulación del modelo orientativo.

Como el modelo ARIMA tuvo una parte estacional se analizaron los gráficos en los primeros retardos para la parte estacionaria y los retardos en cada periodo para el análisis de la parte estacional.

El gráfico de autocorrelación parcial muestra que los dos primeros retardos son diferentes de 0 y q con el aumento de los periodos la función tiende a disminuir. A partir del aumento de los periodos pueden considerarse marcados el primer o los dos primeros rezagos.

El gráfico de autocorrelación simple muestra que los dos primeros retardos son marcadamente diferentes de 0 y q a partir de esta comienzan a variar entre positivos y negativos, esto indica que se toman los dos primeros. Con el aumento de los periodos la función tiende a disminuir. A partir del aumento de los periodos pueden considerarse marcados el primer o los dos primeros rezagos. A partir de aquí se derivaron dos variantes para el modelo $ARIMA(p,d,q),(P,D,Q)$: $ARIMA(2,1,2)(1,1,1)$, $ARIMA(2,1,2)(1,1,2)$, $ARIMA(2,1,2)(2,1,1)$ y $ARIMA(2,1,2)(2,1,2)$.

Método de suavizado exponencial

A partir del modelo, R presenta la función *HoltWinters()* (tabla 3.6) para la aplicación del mismo, esta cuenta con un parámetro que indica si el modelo se realizará con suavizado exponencial, y otro que indica si el modelo es estacional, por defecto son falsos y en correspondencia con las propiedades de los datos analizados, así permanecerán.

Validación de los modelos

Para que el modelo seleccionado sea validado tiene que tener los residuales estacionarios, normalizados e independientes. Para esto se realiza la prueba de ruido blanco o Ljung-Box. Un ruido blanco es una serie tal que su media es cero, la varianza es constante y no se puede correlacionar.

- H_0 : Los datos se distribuyen de forma independiente (es decir, las correlaciones en la población de la que se toma la muestra son 0, de modo que cualquier correlación observada en los datos es el resultado de la aleatoriedad del proceso de muestreo).
- H_a : Los datos no se distribuyen de forma independiente.

Tabla 3.6. Resultados de la prueba estadística a los modelos.

Modelos	Valor p
---------	---------

ARIMA(2,1,2)(1,1,1)	0.9674
ARIMA(2,1,2)(1,1,2)	0.9736
ARIMA(2,1,2)(2,1,1)	0.9864
ARIMA(2,1,2)(2,1,2)	0.9376
HoltWinters()	< 2.2e-16

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de este test aceptan en todos los modelos ARIMA la hipótesis nula. Esto significa que los residuales se distribuyen como un ruido blanco. Por tanto, estos presentan estacionariedad, normalidad e independencia, lo cual implica que se está en presencia de modelos adecuados para la predicción. Sucede diferente en el modelo HoltWinters por lo que es desechado el modelo. Para seleccionar el modelo que mejor ajuste se emplea AIC.

Tabla 3.7. Resultados de AIC en los modelos ARIMA.

Modelos	Valor AIC
ARIMA(2,1,2)(1,1,1)	3044.929
ARIMA(2,1,2)(1,1,2)	3043.881
ARIMA(2,1,2)(2,1,1)	3044.07
ARIMA(2,1,2)(2,1,2)	3042.96

Fuente: elaboración propia.

Según los valores devueltos por el software por el criterio de selección aplicado el modelo ARIMA(2,1,2)(2,1,2) es el más ajustado a los datos (tabla 3.7).

Evaluación del pronóstico

Una vez obtenido el modelo más ajustado a los datos y que cumple con la prueba de Ljung-Box es posible realizar las estimaciones (tabla 3.8).

Tabla 3.8. Predicciones para el año 2021 por variables (indicadores).

Año	Mes	Medición	ISGAE
2021	X1	0.29	0.58
2021	X2	0.18	
2021	X3	0.83	
2021	X4	0.45	
2021	X5	0.92	
2021	X6	0.18	
2021	X7	0.80	
2021	X8	1	

Fuente: elaboración propia.

Al aplicar el MAPE se obtuvo en el modelo aproximadamente 2.108366% de error absoluto que al comparar con el esquema de clasificación se determina como alta precisión, por lo que es un modelo altamente confiable para la predicción de futuros indicadores.

Se calcula el error medio absoluto (MAE) y el error cuadrático medio del modelo (RMSE) en ARIMA(2,1,2)(2,1,2) y se obtiene 0.5096998 y 0.7091234 respectivamente.

Las métricas obtenidas en el modelo lo posicionan, entre los citados en la bibliografía, como el más ajustados y por tanto óptimo para la predicción de los parámetros.

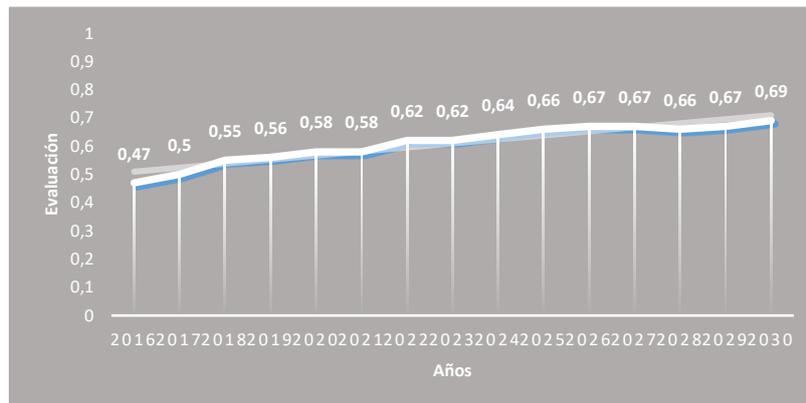


Figura 3.8. Pronóstico de comportamiento del ISGAE en la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas

Fuente: elaboración propia.

Se pronosticó la gestión ambiental en la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas para el período (2020-2030) a partir del empleo del ISGAE determinado mediante técnicas de minería de datos (figura 3.8). Se utilizó la escala de valoración Hedónica para evaluar el pronóstico del ISGAE calculado con un valor promedio de 0.64, lo que implica una evaluación de Bien en la gestión ambiental de dicha empresa.

Fase 3. Implementación del modelo de gestión ambiental empresarial

Una vez materializado el ISGAE, se procede a su implementación en correspondencia con el modelo de gestión ambiental empresarial propuesto, donde se evidencie una adecuada actualización, seguimiento y control del mismo. De modo que se contribuya a la gestión ambiental empresarial desde el proceso de toma de decisiones, las propuestas de mejoras a la gestión y la divulgación de los resultados para su análisis y generalización.

Etapa 3.1. Contribución al proceso de toma de decisiones

Se comunicaron los resultados del análisis a los decisores, el objetivo fue proporcionar a los directivos de las empresas información fiable y precisa del estado actual de su gestión y de sus proyecciones para el futuro.

A partir de esta información, deben trazarse planes de acciones y estrategias encaminadas a garantizar un correcto desempeño empresarial respecto a la gestión ambiental, ya sea para mantener la situación o mejorarla, en dependencia de la interpretación y análisis de los indicadores y del ISGAE.

La información obtenida del análisis una vez comunicada a los decisores, es procesada y convertida en conocimiento; dicho conocimiento será trascendental para un mejor desempeño empresarial. Esto permite definir cuáles son los indicadores de

mayor incidencia en la gestión ambiental, entre otras inferencias que se deducen del análisis.

El OBSAM-Costatenas se perfila, cada vez más, como una estructura de interfase que observa y analiza críticamente los procesos ambientales en toda su complejidad, para convertirse en una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, lo que fortalece su rol como interlocutor que a través de la ciencia ayuda a discernir entre lo sostenible y lo que no lo es, y transmitirlo al público y a los decisores, para favorecer la mejora continua de las políticas y acciones de gestión ambiental integrada (Pérez Martínez, 2019).

La labor del OBSAM es eminentemente analítica, informativa y propositiva, por lo que se propicia una fuerte interacción con los científicos e investigadores, con los empresarios y decisores de todos los niveles, y con las personas involucradas en la realidad ambiental que se analiza.

El OBSAM-Costatenas funciona como una plataforma de información y análisis ambiental, de libre acceso, que aporta insumos para la toma de decisiones, en diferentes niveles. Con esta plataforma amplia y multipropósitos, se procura romper fronteras y fortalecer sinergias, con la articulación de las diferentes escalas del análisis ambiental y de la toma de decisiones vinculada a esos análisis. En tal sentido, cabe destacar que se trabaja en el nivel específico de la gestión ambiental de las empresas, para lo cual se ha estimulado la creación de un software denominado SAPGAE (Sistema de Ayuda para la Gestión Ambiental Empresarial), que está en funcionamiento, con un papel protagónico de la Empresa XETID, pero al mismo tiempo se trabaja hacia una escala superior y en respuesta al Sistema Nacional de Información Ambiental, todo esto desde las plataformas digitales de Gobierno Electrónico.

Etapa 3.2. Propuestas de mejoras

Actualización de la política científica respecto a la gestión ambiental empresarial desde el empleo del OBSAM-Costatenas como herramienta de interfase para la gestión ambiental, de acuerdo a los siguientes aspectos:

- Trabajo por líneas de investigación y proyectos inter, multi y transdisciplinarios, como es inherente a los temas ambientales y del cambio climático.
- Identificación de oportunidades y fortalezas para dar respuestas a las prioridades y/o exigencias sociales.
- Generación de resultados concretos e impactos, así como su transferencia al sector social.

- Potenciación de la participación en redes que facilitan la integración, la implementación y la difusión de la actividad científica.
- Redimensionamiento de los recursos humanos en función de su propia actividad científica.
- Visión de gestión del conocimiento y la investigación en función del desarrollo: proyección práctica-aplicada en la esfera socio-ambiental.

Entre las ventajas obtenidas es posible citar el empleo de las tecnologías de la informática y la comunicación, como principal aliado, para la conformación y puesta en funcionamiento de esta plataforma, donde se puede encontrar la información y análisis ambientales sobre la base de un conjunto amplio y diversificado de objetivos e indicadores relevantes, así como capas de sistemas de información geográfica e imágenes satelitales, abundantes datos abiertos y aplicaciones ciudadanas.

Todo esto aparece estructurado en un sitio web, a través de varios módulos, entre los que sobresalen:

- Información y análisis de objetivos, indicadores ambientales e ISGAE: que constituye una sección principal, y se socializa a través de Fichas, Reportes y Alertas tempranas.
- Geoportal: que facilita la visualización de mapas e imágenes satelitales mediante el vínculo con Sistemas de Información Geográfica.
- Datos abiertos y actividades: que abarcan una gran cantidad de información complementaria sobre proyectos en ejecución y resultados científico-técnicos, actividades de colaboración, actividades de capacitación y formación, Tesis de Doctorados y Maestrías en desarrollo, actividades y trabajos científico estudiantiles, publicaciones y eventos, entre otras.
- Repositorio: que contienen documentos de consulta, informes científico-técnicos, así como libros y artículos relacionados con los temas del Observatorio.
- Comunicación e interacción ciudadana: que se enfoca a la divulgación, educación y participación de los ciudadanos y de las diversas organizaciones de la sociedad, mediante diversas aplicaciones.

Etapas 3.3. Divulgación de los resultados

El Observatorio Ambiental Costatenas, es un producto tangible que surgió en el marco del Proyecto “Observatorios automatizados enfocados a la gestión ambiental empresarial. Casos pilotos Bahía de Matanzas y Bahía de La Habana” (2016-2018), adscripto al Programa Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación “Automatización de Procesos Tecnológicos”. A partir del año 2019, en que cierra dicho proyecto, se inicia una etapa de continuidad al trabajo realizado con la aprobación del Proyecto

“Observatorio Ambiental Costatenas: soporte técnico para el seguimiento y la toma de decisiones en relación al cambio climático en la zona costera norte de la provincia de Matanzas” (2019-2021) adscripto al Programa Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación “Enfrentamiento al Cambio Climático”.

El OBSAM-Costatenas es coordinado por el Grupo de investigación del mismo nombre, de la Universidad de Matanzas, con una activa participación de la Unidad de Medioambiente de la Delegación Territorial de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Matanzas, el Centro de Servicios Ambientales de Matanzas, la Empresa XETID, el Grupo de Trabajo Estatal de Bahía de La Habana, y otras empresas y entidades asociadas.

Responde a los Lineamientos del PCC y de la Revolución, y al Plan de Desarrollo hasta el 2030, muy específicamente a desarrollar investigaciones integrales para proteger, restaurar y gestionar de manera integral el medioambiente y a elevar el rol de las universidades en función de las necesidades del desarrollo económico y social del país, y a estrategias nacional y territoriales de medioambiente y desarrollo sostenible en las que los asuntos de la gestión ambiental, y el consecuente enfrentamiento a las amenazas del Cambio Climático y los riesgos naturales están en el centro de atención.

COSTATENAS es Miembro activo del Consejo Provincial de Medio ambiente, que coordina la Unidad de Medio Ambiente del Citma en Matanzas, de las Juntas de Manejo Costero Integrado de la Bahía de Matanzas y del municipio Martí, que dirigen los Gobiernos locales y el Citma territorial, y del Consejo Técnico Asesor de Ciencia y Técnica, del Citma en Matanzas.

Se pretende así brindar un acompañamiento científico y técnico a las autoridades gubernamentales y ambientales del territorio, lo que conlleva fortalecer diversas formas de interrelación y colaboración enfocada en la toma de decisiones y en la implementación de la gestión basada en el conocimiento científico de las tendencias del clima cambiante y sus consecuencias.

Desde el año 2018, el OBSAM emite Reportes Anuales, que se conciben como una especie de radiografía ambiental y de la sostenibilidad del área de incumbencia, sobre la base de los objetivos e indicadores relevantes que permiten la construcción dinámica del ISGAE. Además, emite pronósticos y avisos de Alerta Temprana, y es por ello que, en apoyo al cumplimiento cabal de todas sus tareas y compromisos, el OBSAM COSTATENAS tiene en sus proyecciones inmediatas la creación y puesta en funcionamiento de sistemas de monitoreo permanente y de medios de comunicación en tiempo real (aplicaciones para dispositivos móviles) asociadas a su dispositivo

matriz, con el objetivo de potenciar las mediciones, observaciones y análisis que se realizan en tiempo real.

Para ello se ha concretado un circuito dinámico de información, investigaciones y monitoreo (análisis y evaluación) y propuestas para la toma de decisiones y la gestión, a partir de un conjunto de aspectos, indicadores y casos pilotos de estudio, que permiten avanzar hacia la detección de tendencias en la gestión ambiental de las empresas a través del ISGAE, y hacia la evaluación y mejora de las respuestas que implementen.

En relación con lo anterior, el OBSAM ha permitido establecer un conjunto de principios y misiones, entre las que destacan:

- Evolucionar hacia una plataforma tecnológica que reúna y facilite, para su público objetivo, de forma permanente, información, análisis y propuestas para la toma de decisiones e implementación de la gestión.
- Ser un sistema permanente y actualizado que integre, en una base de datos, información parcialmente dispersa.
- Organizar la información disponible de acuerdo a estándares, indicadores y casos pilotos de estudio a través del ISGAE.
- Elaborar y suministrar, de manera sistemática reportes, boletines, análisis, proyecciones y otras informaciones generadas desde el Observatorio.
- Detectar y comunicar tendencias y proyecciones de futuro.
- Evaluar el impacto de las acciones, y precisar zonas de riesgo y vulnerabilidades.
- Proponer acciones, alternativas y estrategias de investigación, capacitación, divulgación e intervención, basada en información y ciencia confiable y válida.
- Facilitar el intercambio periódico, y la construcción colectiva.
- Fomentar un continuo proceso de gestión del conocimiento y de elevación de la cultura del personal del Observatorio y de su público objetivo.
- Contar con un Repositorio interno y un Geo-portal de apoyo.

Los resultados obtenidos en el proceso de implementación del modelo, son socializados desde la plataforma web del Observatorio Ambiental Costatenas (OBSAM-Costatenas), el mismo, a su vez, constituye un resultado de esta investigación. La web del OBSAM (figura 3.9) cuenta con siete módulos, tres de ellos de gestión de información: Indicadores, Geoportal y Proyectos, y cuatro de consulta de la información: Tesis, Capacitación, Repositorio, y Cambio Climático/Tarea Vida.



Figura 3.9. Vista web del Observatorio Ambiental Costatenas

Fuente: www.obsamcostatenas.umcc.cu

En el funcionamiento de la web como un sistema en constante intercambio entre sus módulos, la información juega un papel fundamental, donde todo el proceso interno que se realiza para convertir dicha información en conocimiento, hace de ella una herramienta indispensable en el trabajo del Observatorio para alcanzar sus objetivos. El flujo de la información en el OBSAM-Costatenas (Anexo 3.4) se puede describir a partir de siguientes momentos esenciales:

- **INFORMACIÓN:** Las principales fuentes de información con las que se alimenta la web del OBSAM provienen de resultados de los reportes de las empresas, Proyectos de Investigación, informes ambientales y documentos del Citma y Centros de Investigación.
- **WEB COSTATENAS:** La información recopilada de las diferentes fuentes se organiza dentro de la web en las Fichas de Indicadores y de Casos de Estudio para facilitar el posterior procesamiento de la misma. Entre ambas fichas existe una fuerte retroalimentación, ya que todas tributan a la evaluación del desempeño ambiental de las empresas (casos de estudio) mediante el ISGAE). Las Fichas de Indicadores almacenan toda la información a ser procesada, mientras que los Casos de Estudio se nutren a partir de los indicadores que almacena la web.
- **INFORMACIÓN PROCESADA:** Una vez aplicado los algoritmos de procesamiento automático para realizar predicciones, clasificar la información y buscar las relaciones existentes, la información procesada queda lista para ser analizada por los especialistas vinculados al observatorio donde definen a partir de la misma, la relación causa-efecto de los problemas detectados y mediante las predicciones realizar pronósticos del comportamiento de futuros escenarios, lo que les permite realizar una evaluación general de las problemáticas detectadas y sus tendencias, con la transformación de la información inicial en conocimiento

listo para ser divulgado mediante reportes, boletines a los diferentes actores identificados que intervienen en estos procesos.

- **TOMA DE DECISIONES:** El proceso de toma de decisiones, en correspondencia con los métodos analizados previamente, se concibe en cinco fases principales (Observación, Modelación, Recopilación, Análisis, Selección) en las cuales los especialistas del OBSAM tienen una fuerte influencia en las dos primeras pues a partir de la observar la realidad pueden detectar los problemas y realizar un análisis del mismo, lo que permite modelar el problema y brindar asesoría en todo el proceso, a partir del conjunto de alternativas y criterios que se suministra una vez procesada toda la información de las fichas.

3.3. Conclusiones del capítulo

El despliegue del modelo a través de la implementación del procedimiento general propició la evaluación de la gestión ambiental empresarial en la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas, dada por la consecución de los resultados siguientes, derivados de la implementación de los procedimientos específicos:

1. El diagnóstico de la situación ambiental inicial, a partir de la determinación de los principales indicadores ambientales que inciden en el proceso de gestión ambiental, clasificados de acuerdo a las categorías que establece la metodología P-E-I-R resultó en la concreción de ocho indicadores ambientales generales por áreas temáticas y 76 indicadores específicos que caracterizan la gestión ambiental en la la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas.
2. Se evaluó la gestión ambiental en la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas para el período (2016-2021) a partir del empleo del ISGAE determinado mediante técnicas de minería de datos. Se utilizó una escala de valoración Hedónica para evaluar el ISGAE calculado con un valor promedio de 0.54, lo que implica una evaluación de Regular en la gestión ambiental de dicha empresa.
3. Se pronosticó la gestión ambiental en la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas para el período (2020-2030) a partir del empleo del ISGAE determinado mediante técnicas de minería de datos. Se utilizó una escala de valoración Hedónica para evaluar el pronóstico del ISGAE calculado con un valor promedio de 0.64, lo que implica una evaluación de Bien en la gestión ambiental de dicha empresa, que permite anticipar escenarios futuros y constituye un sistema de alerta temprana.

4. Se propuso el OBSAM-Costatenas como herramienta de apoyo a la gestión ambiental y como sistema de retroalimentación del flujo informativo, lo que constituye una mejora significativa del proceso en conceptos de ahorro de tiempo, recursos y disponibilidad de información.

CONCLUSIONES

1. El desarrollo del marco teórico referencial denotó la relevancia de la gestión ambiental y la gestión ambiental empresarial, así como los procesos de control de gestión asociados a ellas, con énfasis en indicadores e índices sintéticos y su aplicación en la evaluación de la gestión ambiental como una herramienta para la toma de decisiones; evidenció la necesidad de aplicar métodos y procedimientos para la construcción de índices sintéticos como herramientas de gestión ambiental, con el valor añadido del empleo de técnicas de minería de datos, como las herramientas que constituyen buenas prácticas a nivel mundial, lo que representa un referente conceptual, teórico y práctico significativo.
2. La pertinencia del problema científico planteado, se corrobora en la elaboración del procedimiento general y los procedimientos específicos para la determinación del índice sintético para la evaluación de la gestión ambiental empresarial, que permite evaluar, actualizar y perfeccionar dicho proceso, como contribución a la toma de decisiones.
3. El procedimiento general para la evaluación de la gestión ambiental empresarial mediante el ISGAE, está compuesto por tres fases y seis etapas y se sustenta en el estudio de la mejora de procesos, lo cual demuestra la factibilidad de particularizarlo para la gestión ambiental empresarial.
4. Los procedimientos específicos (3) constituyen apoyo al procedimiento general, permiten el diagnóstico inicial de la gestión ambiental de las empresas a través de: el cálculo de los indicadores ambientales, la evaluación del desempeño ambiental mediante el ISGAE y el pronóstico de escenarios futuros, la planificación y ejecución de estrategias para la mejora, así como la implementación de herramientas de apoyo.
5. El empleo del OBSAM-Costatenas como herramienta tecnológica facilitó la gestión de la información ambiental en forma de indicadores e ISGAE de forma tal que, el análisis pertinente sobre temáticas ambientales pueda integrar los diferentes factores ambientales, sociales, económicos y tecnológicos de las empresas. Además de proporcionar a las empresas acceso a bases de datos de series históricas en el campo ambiental; y a la vez coadyuvar al mejoramiento de los sistemas de información de las mismas mediante una red de capacidades técnicas y científicas basada en los departamentos universitarios, centros de investigación y otras entidades públicas y privadas que proporcionen la mejor información disponible y con basamento científico.
6. Mediante el despliegue del modelo conceptual a través del procedimiento general y sus específicos asociados, en el caso de estudio, se establecieron las pautas

para el análisis integral e implementación de mejoras en la gestión ambiental. Por otra parte, se instituyó el ISGAE, que mejora el flujo informativo y establece asociaciones entre los diferentes indicadores implicados y se automatizó el modelo en un ambiente web que permite el acceso a la información del proceso por todas las partes interesadas en el mismo.

7. Los resultados presentados permiten concluir que la hipótesis de la investigación quedó comprobada a partir de: la verificación mediante redes de Petri de la robustez estructural y funcional del procedimiento metodológico desarrollado; el reconocimiento por los usuarios de su utilidad, pertinencia y factibilidad de uso, sustentado en el comportamiento del Índice Iadov (0,89); y, la aplicación experimental a un caso de estudio que permitió demostrar empíricamente su contribución en la evaluación efectiva y proactivamente de la gestión ambiental empresarial.

RECOMENDACIONES

1. Continuar el despliegue del modelo conceptual y su procedimiento general en las empresas del territorio como casos de estudio, con seguimiento a los indicadores ambientales y al ISGAE, para contribuir a la retroalimentación y mejora continua del proceso.
2. Los resultados alcanzados a través del procedimiento general y sus procedimientos específicos, apoyados en las herramientas propuestas, sugieren su recomendación como instrumentos válidos de insertar en la gestión ambiental de las empresas.
3. Divulgar los resultados de la investigación, en virtud de que alcancen su mayor consolidación, como componente práctico en las empresas y como referente docente en la enseñanza de pre y postgrado en las especialidades afines, basado en la elaboración de artículos, monografías y presentación de ponencias.
4. Desarrollar una estrategia de formación para los especialistas de la Unidad de Medio Ambiente de la Delegación Territorial del Citma, en cuanto al instrumento metodológico propuesto, de manera que contribuya a generalizar los resultados en otras empresas, con la adecuada adaptación del ISGAE, y la inserción de otros instrumentos útiles (licencias ambientales, sistemas de información ambiental, educación ambiental, evaluaciones de impactos ambientales, investigación científica e innovación tecnológica) en la gestión, mejora y control ambiental en sus procesos.
5. Mantener actualizado el entorno virtual de soporte al flujo de información del proceso, de modo que contribuya a la articulación entre las empresas, las Agencias Ambientales y la Universidad de Matanzas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta, A. (2017). A Pequena Empresa. Rio de Janeiro: Direito e Práxis. 8(1). DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8966/2017/31220> Disponible en: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2179-89662017000402927&script=sci_arttext
2. Actis di Pasquale, E. (2015). La elaboración de índices sintéticos de bienestar social. Validación teórica y empírica del método de agregación/ponderación. Artículo presentado al Congreso Nacional de Estudios del Trabajo. El trabajo en su laberinto. Viejos y nuevos desafíos. 5, 6 y 7 de agosto de 2015, Buenos Aires, Argentina. Disponible en: <https://nulan.mdp.edu.ar>.
3. Afzal, M. A. F., Haghghatlari, M., Ganesh, S. P., Cheng, C., & Hachmann, J. (2019). Accelerated discovery of high-refractive-index polyimides via first-principles molecular modeling, virtual high-throughput screening, and data mining. *The Journal of Physical Chemistry C*, 123(23), 14610-14618.
4. Águila Rodríguez, N., Montenegro Calderón, T., Delgado Acosta, H., Valdés Gómez, M., Rodríguez Fernández, L., & Bravo Polanco, E. (2018). Evaluación de indicadores sintéticos del programa de tuberculosis. *Áreas de salud I y II. Cienfuegos 2013. MediSur*, 16(4), 522-530. ISSN 1727-897X. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-897X2018000400006
5. Al Mamun, S., & Lownes, N. E. (2011). A Composite Index of Public Transit Accessibility. *Journal of Public Transportation*, 14(2). Disponible en: <https://doi.org/11.258/jpt.2011.1007>.
6. Alcover, R., Benlloch, J., Blesa, P., Calduch, M. A., Celma, M., Ferri, C. & Zúnica, L. R. (2007). Análisis del rendimiento académico en los estudios de informática de la Universidad Politécnica de Valencia aplicando técnicas de minería de datos. Teruel, España. Disponible en: <http://bioinfo.uib.es/~joemiro/aenui/procJenui/Jen2007/laalta.pdf>.
7. Álvarez Scanniello, J. (2020). Desempeño relativo de la productividad física de la ganadería de Nueva Zelanda y Uruguay, 1870-2010. DOI: 10.26882/histagrar.080e06a Disponible en: <http://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/188288>
8. Andrés Suárez, J. (2000). Técnicas de Inteligencia Artificial aplicadas al análisis de la solvencia empresarial. Documentos de trabajo (Universidad de Oviedo. Facultad de Ciencias Económicas).

9. Antúnez Sánchez, A. (2019). El Derecho Forestal en el ordenamiento jurídico cubano. *Revista de la Facultad de Derecho de México*, 69(274-2), 593-626. Disponible en: <http://revistas.unam.mx/index.php/rfdm/article/view/69904>
10. Ardila Delgado, A., & García Solano, D. J. (2017). Construcción de un índice sintético de desempeño institucional municipal en Colombia. *Revista del CLAD Reforma y democracia*, 67, 125-162. Disponible en: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/3575/357550203005/index.html>.
11. Armas Pérez, L., Pérez Chacón, D., Castro Peraza, M., González Díaz, A., & González Ochoa, E. (2015). Validez y fiabilidad de indicadores sintéticos para la vigilancia y control de la tuberculosis. *Revista Cubana de Medicina Tropical*, 67(1), 28-40. Versión impresa ISSN 0375-0760. Versión On-line ISSN 1561-3054. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0375-07602015000100004&script=sci_arttext&lng=en
12. Arteta Peña, Y., Moreno Pino, M. R., & Steffanell De León, I. (2017). Modelo para dinamizar la gestión ambiental en cuencas con enfoque socialmente responsable. *Ciencias Holguín*, 23(4), 58-70. Disponible en: <http://www.ciencias.holguin.cu/index.php/cienciasholguin/article/view/1055>
13. Ávila Zarta, P. (2018). La sustentabilidad o sostenibilidad: un concepto poderoso para la humanidad. *Tabula Rasa*, 28, 409-423. ISSN 1794-2489. Disponible en: <https://doi.org/10.25058/20112742.n28.18> .
14. Babbar, R., & Babbar, S. (2017). Predicting river water quality index using data mining techniques. *Environmental Earth Sciences*, 76(14), 1-15. Disponible en: https://www.researchgate.net/publications/318677791_Predicting_river_water_quality_index_using_data_mining-techniques.
15. Baquero Valiente, L. M. (2019). El derecho ambiental cubano y la asamblea de Naciones Unidas para el medioambiente. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, (2019-04). Disponible en: <https://ideas.repec.org/a/erv/rccsrc/y2019i2019-0438.html>
16. Benítez, S. M., Romero, O. J., & Gil, E. C. (2015). Indicadores sintéticos de bienestar social: una aplicación para los municipios del estado de Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1, 293-305.
17. Berumen, S. A., & Redondo, F. L. (2007). La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente. *Cuadernos de administración*, 20(34), 65-87.
18. Bravo, O. (2018). Dimensión territorial de la innovación y el conocimiento en Ecuador. *Dimensión*, 39(32). ISSN: 0798 1015. Disponible en: <http://www.1.revistaespacios.com/a18v39n32/a18v39n32p31.pdf>

19. Breiman, L. (26 de noviembre de 2019). University of California, Berkeley - RANDOM FORESTS. Disponible en: <https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/randomforest2001.pdf>.
20. Briggs, C A, Tolliver, D y Szmerekovsky, J. (2012). Managing and mitigating the upstream petroleum industry supply chain risks: leveraging analytic hierarchy process. s.l: International Journal of Business and Economics Perspectives, VII.
21. Brito Viñas, B. C. (2000). Modelo conceptual y procedimientos de apoyo a la toma de decisiones para potenciar la función de Gestión Tecnológica y de la innovación en la empresa manufacturera cubana. (Tesis de Doctorado), Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara. Disponible en: Repositorio de tesis de doctorado Ingeniería Industrial.
22. Buesa Blanco, M., Heijs, J., & Kahwash, O. (2013). Calidad de las universidades: un índice sintético. Disponible en: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/31243/>
23. Buschke, FT, Hagan, JG, Santini, L. y Coetzee, BW. (2021). Random population fluctuations skew the Living Planet Index. *Nature Ecology & Evolution*, 5 (8), 1145-1152. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41559-021-01494-0>
24. Cabral, V. N., & Zulaica, M. L. (2015). Análisis de la vulnerabilidad socioambiental en áreas del periurbano de Mar del Plata (Argentina) expuestas a agroquímicos. ISSN: 1317-2255. Disponible en: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/62432>
25. Camana, R. G. (2016). Potenciales aplicaciones de la minería de datos en Ecuador. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 29(1).
26. Camargo Rodríguez, S., Franco López, J. A., Chud Pantoja, V. L., & Osorio Gómez, J. C. (2017). Modelo de simulación dinámica para evaluar el impacto ambiental de la producción y logística inversa de las llantas. *Ingeniería y desarrollo*, 35(2), 357-381. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612017000200357
27. Campos Freire, F., & Valencia Bermúdez, A. (2016). Value indicators for regional broadcasters: accountability at EITB, CCMA and CRTVG. Disponible en: <https://dadun.unav.edu/handle/10171/41833>
28. Campoverde, J. A., Romero Galarza, C. A., & Borenstein, D. (2019). Evaluación de eficiencia de cooperativas de ahorro y crédito en Ecuador: aplicación del modelo Análisis Envolvente de Datos DEA. *Contaduría y administración*, 64(1), 0-0. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0186-10422019000100011&script=sci_arttext
29. Cardoso, M. M. (2017). Estudio de la vulnerabilidad socio-ambiental a través de un índice sintético. Caso de distritos bajo riesgo de inundación: Santa Fe, Recreo y

- Monte Vera, Provincia de Santa Fe, Argentina. Cuaderno de Geografía, 27(48), 156-183.
30. Carrascal, O., Carrascal, O., & Saldarriaga, V. (2015). Minería de datos: aportes y tendencias en el servicio de salud de ciudades inteligentes. *Revista politécnica*, 11(20), 111-120.
31. Casabán Planells, P. (2020). Aplicación de la técnica Proceso Analítico Jerárquico (AHP) de análisis de decisión multicriterio a la selección de carteras de proyectos de una empresa del sector de las energías renovables (Doctoral dissertation).
32. Castañeda Abascal, I. E., Morúa-Delgado Varela, L. D. P., Segura Sardiñas, O., Martínez Rodríguez, V., & Sánchez Iglesias, V. (2013). Indicadores sintéticos para la medición de las diferencias de género en el contexto social cubano. *Revista Cubana de Salud Pública*, 39, 665-678.
33. Castro Torres, A. S., & Suysuy Chambergo, E. J. (2020). Herramientas de gestión ambiental para reducir el impacto de los costos ambientales en una empresa de construcción. *Revista Universidad y Sociedad*, 12(6), 82-88. Disponible en: https://redib.org/Record/oai_revista3566-universidad-y-sociedad.
34. CC-PCC. (2017). RESOLUCIÓN SOBRE EL INFORME CENTRAL AL 7mo. CONGRESO DEL PARTIDO COMUNISTA DE CUBA. Disponible en: <https://www.pcc.cu/vii-congreso> [sitio oficial del PCC].
35. CC-PCC. (2021). RESOLUCIÓN SOBRE EL INFORME CENTRAL AL 8vo. CONGRESO DEL PARTIDO COMUNISTA DE CUBA. Disponible en: <https://www.pcc.cu/viii-congreso> [sitio oficial del PCC].
36. Celemín, J. P., & Velázquez, G. Á. (2015). Elaboración y aplicación de un índice de calidad ambiental para la región del nordeste argentino, 2010. *Economía, sociedad y territorio*, 15(47), 123-151. Versión On-line ISSN: 2448-6183. Versión impresa ISSN: 1405-8421. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-84212015000100006&script=sci_arttext
37. CEPAL. (2004). Curso de Indicadores de Desarrollo Sostenible. Buenos Aires, Argentina.
38. CEPAL. (2017). Estudio Económico de América Latina y el Caribe 2017: la dinámica del ciclo económico actual y los desafíos de política para dinamizar la inversión y el crecimiento. Signatura: LC/PUB.2017/17-P. ISBN: 9789211219593, 217 p. Editorial: CEPAL. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/42001>.
39. Cobos Aguilar, H. (2016). Lectura crítica de investigación en educación médica. *Metodología de Investigación en Educación Médica*, 5 (18), 115-120. DOI:

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.riem.2016.01.024>. Disponible en: <http://riem.facmed.unam.mx>.
40. Comas Rodríguez, R. (2013). Integración de herramientas de control de gestión para el alineamiento estratégico en el sistema empresarial cubano. Aplicación en empresas de Sancti Spiritus. (Tesis de Doctorado), Universidad de Matanzas sede Camilo Cienfuegos, Facultad de Ciencias Económicas e Informáticas. Disponible en: Repositorio de tesis de doctorado Ingeniería Industrial.
 41. Comas Rodríguez, R., Nogueira Rivera, D., Romero Bartutis, F., & Lumpuy Rodríguez, M. (2015). Integración de herramientas para el control de gestión. Análisis de un caso de estudio. *Enfoque UTE*, 6(3), 1-19. ISSN: 1390-6542. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/320993065>.
 42. Córdoba Durán, V. (2016). Implementación del proceso de gestión ambiental en la exploración de bloques evaluados para extracción de recursos minerales (gas natural y petróleo). Disponible en: <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1879>
 43. Corvalán, J. G. (2020). Artificial Intelligence, Pretoria, and Algorithmic Oracles in Law. *International Journal of Digital Law*, 1(1), 11-52. Disponible en: <https://journal.nuped.com.br/index.php/revista/article/view/corvalanv1n1>
 44. Cos Guerra, O. & Velasco, P. R. (2019). Territorial and demographic vulnerability in Spain. Possibilities of multicriteria analysis and fuzzy logic for the definition of spatial patterns. *Investigaciones Regionales-Journal of Regional Research*, (45), 201-225.
 45. Cottrell, S., van der Duim, R., Ankersmid, P., & Kelder, L. (2004). Measuring the Sustainability of Tourism in Manuel Antonio and Texel: A Tourist Perspective. *Journal of Sustainable Tourism*, 12(5), 409-431. ISSN: 096-9582. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/40123442>.
 46. Cousera. (2010). "Dimensionality Reduction - Advice for applying Principal Component Analysis". curso Machine Learning Stanford.
 47. Covas Varela, D. (2019). Contribución a la evaluación y gestión de la calidad de vida urbana en ciudades de primer orden en Cuba. (Tesis de Doctorado), Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Cuba. Disponible en: Repositorio de tesis de doctorado Ingeniería Industrial.
 48. Cox, D. R., Fitzpatrick, R., Fletcher, A., Gore, S., Spiegelhalter, D., & Jones, D. (1992). Quality-of-life assessment: can we keep it simple? *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)*, 155(3), 353-375.
 49. Cruz García, L.; Carreón Guillén, J., Sánchez, A. S., Velázquez, F. R. S., & Flores, M. D. L. M. (2016). Reliability and validity of an instrument that measures educational leadership and management. *Ehquidad International Welfare Policies*

- and Social Work Journal, 5, 109-130. ISSN 23864915. DOI: 10.15257/ehquidad.2016.0004. Disponible en: <http://revistas.proeditio.com/ehquidad/article/view/1334/1415>.
50. Dallavalle de Pádua, S. I.; Yoshizawa da Silva, A. R.; Vieira Porto, A. J. & Yassushi Inamasu, R. (2004). O potencial das redes de Petri em modelagem e análise de processos de negócio. *Gestao & Producao*, 11 (1), 109-119.
51. Dávila Hernández, F., & Sánchez Corales, Y. (2012). Técnicas de minería de datos aplicadas al diagnóstico de entidades clínicas. *Revista Cubana de Informática Médica*, 4(2), 174-183.
52. de Castro Alcântara, V., dos Santos Macedo, A., Silva, E. A., Ferreira, A. C., & Mendes, A. C. A. (2017). Modelo de avaliação da responsabilidade ambiental empresarial aplicado a cadeia produtiva do agronegócio: análises, considerações e críticas. *Revista de Administração da Universidade Federal de Santa Maria*, 10(3), 493-513. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2734/273453338008.pdf>
53. De Vicente y Oliva, M., & Calvo, M. Á. M. (2005). Objective Competitiveness Ranking amongst EU Regions (Objective Method for Quantifying Regional Competitiveness-a case study applied to EU15 Regions).
54. Domínguez Serrano, M., Blancas Peral, F. J., Guerrero Casas, F. M., & González Lozano, M. (2011). Una revisión crítica para la construcción de indicadores sintéticos. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 11, 41-70. Disponible en: <https://www.econstor.eu/handle/10419/59089>
55. Dong Bing (2021). Review of onsite temperatura and solar forecasting model to enable better building desing and operations, in *Building Simulation*. Tsinghua University Press. p. 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0759-2>
56. Donnelly, A., Jones, M. B., O'Mahony, T., & Byrne, G. (2006). Selecting Environmental Indicators for Use in Strategic Environmental Assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 2007(27), 161-175. ISSN: 0195-9255. Disponible en: <https://www.elsevier.com/locate/eiar>.
57. EEA (1999). *Environmental indicators: Typology and overview*, European Environment Agency, Copenhagen. 1999.
58. Emaides, A., Salerno, M. L., & Paredes, M. D. (2018). Políticas públicas para el desarrollo sustentable: indicadores de gestión ambiental. *InterNaciones*, (13), 131-158. Disponible en: <https://internaciones.cucsh.udg.mx/index.php/inter/article/view/7069>
59. Escobar Jaramillo, L. A. (2006). Indicadores sintéticos de calidad ambiental: un modelo general para grandes zonas urbanas. *Eure (Santiago)*, 32(96), 73-98.

- ISSN: 0250-7161. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0250-71612006000200005&script=sci_arttext
60. Espinoza, G. (2002). *Gestión y fundamentos de evaluación de impacto ambiental*. OFERTA/CED.
 61. Felicori, C. (2019). PROYECTO DE LEY-Texto de Nueva Constitución de la República de Cuba, aprobado en el 22 de diciembre de 2018, y que será sometida a referendo popular para su ratificación el próximo 24 de febrero de 2019. *Boletín Jurídico del Observatorio de Libertad Religiosa de América Latina y El Caribe*, (3).
 62. Fernández Carvajal, A. B., Gómez, L. M. R., & Fernández, L. R. (2016). The process of economic convergence between Spain and the EU (2008-2012). *RUE: European University Review*, (25), 43-58. Disponible en: <http://www.revistarue.eu/RUE/082016.pdf>
 63. Fernández Melián, M. C. & Rodríguez de la Fuente, J. J. (2019). Aproximaciones a la imputación de ingresos desde los estudios de análisis de clase. Una propuesta a partir del uso de técnicas de análisis factorial.
 64. Fernández Román, L. (2017). *Gestión ambiental en empresas turísticas*. Escuela de Altos Estudios de Hotelería y de Turismo Formatur.
 65. Ferreira Lopes, S. D. (2011). Análisis conjunto. Teoría, campos de aplicación y conceptos inherentes. *Estudios y perspectivas en turismo*, 20(2), 341-366.
 66. Figueroa Arcila, V. F., & Herrero Prieto, L. C. (2003). Analysis of economic convergence through synthetic development indicators: application to the case of Chile. Disponible en: <https://ebuah.uah.es/xmlui/handle/10017/32320>
 67. Filgueiras Sainz de Rozas, M. L. (2013). *Creación y desarrollo de capacidad de absorción de tecnología en organizaciones de base productiva de la generación distribuida cubana*. (Tesis de Doctorado), Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. Centro de Estudios de Gestión de Ciencias e Innovación, La Habana, Cuba.
 68. Foro Económico Mundial (2000). *World Competitiveness Report*. Ginebra, Suiza: Center for International Development.
 69. Freudenberg, M. (2003). *Composite indicators of country performance: a critical assessment*.
 70. Galindo, Á. J., & García, H. (2010). *Minería de Datos en la Educación*. Universidad Carlos III, 1-8.
 71. Galindo, E. L., Flores Domínguez, Á. D., & Zulaica, M. L. (2018). Evaluación de las condiciones de habitabilidad de la Ciudad de Puebla (México), mediante la construcción de un índice sintético. Disponible en: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/82497>

72. García Céspedes, D., Calderón Peñalver, P. A., Ruiz Gutiérrez, L., Santana Romero, J. L., Bello Hernández, M., & Lima Cazorla, L. (2014). Propuesta de metodología de gestión ambiental para agro ecosistemas con riesgos a la salud por contaminación química. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 13(4), 592-604. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1729-519X2014000400011&script=sci_arttext&tlng=en
73. García de Fernando, G. D. (2018). ¿Es posible un índice de bancarización en Argentina? Una aplicación espacial para Córdoba, Entre Ríos y Santa Fe. *Estudios económicos*, 35(70), 57-77.
74. García Pulido, Y. A. (2018). Contribución a la gestión de la inocuidad de los alimentos en servicios gastronómicos. (Tesis de Doctorado), Universidad de Matanzas, Matanzas. Disponible en: Repositorio de tesis de doctorado Ingeniería Industrial.
75. García Suárez, J. A. (2019). La capacidad de crear en turismo. Propuesta de un índice sintético para medir la creatividad en destinos turísticos. RUJA: Repositorio Institucional de Producción Científica. España. ISBN: 9788491592051. Disponible en: <http://ruja.ujaen.es/handle/10953/941>
76. Geoghegan, R. (2006). *Time series analysis and its applications: with R examples*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52452-8>.
77. Goinheix, S., Freigedo, M., & Ruiz Díaz, M. (2020). Proposal for the application and adaptation of the subnational Local Autonomy Index in Uruguay. Working Paper On Line/FCS-ICP; 01/20.
78. Gómez Benito, J. y Dolores Hidalgo, M. (2015). La validez en los tests, escalas y cuestionarios. Antioquía, Colombia, Centro de Estudio de Opinión. Universidad de Antioquia Facultad de Ciencias Sociales y Humanas. Disponible en: <http://ceo.udea.edu.co>.
79. Gómez Silva, M. J. (2019). Appearance similarity learning for multi-person tracking and re-identification. Disponible en: <https://doi.org/10.1049/ic.2016.0093>.
80. González, P., & Bermúdez Rodríguez, T. (2011). Gerenciando intangibles en empresas de software aplicando el proceso de análisis por jerarquías y el cuadro de mando integral. *Revista Facultad de Ciencias Económicas*, 19(2), 89-104. ISSN: 0121-6805. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90922735006>.
81. González Arias, M., Frías Jiménez, R. & Gómez Figueroa, O. (2016). Análisis de la calidad percibida por el cliente en la actividad hotelera. *Revista Ingeniería Industrial*, 37(3), 253-265. ISSN 1815-5936. Disponible en: <https://rii.cujae.edu.cu/index.php/revistaind/issue/view/52>.

82. Guarín Villamizar, O. (2017). Metodología para evaluación de la condición ambiental en microcuencas urbanas. *Revista UIS Ingenierías*, 16(2), 141-149. Disponible en: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/5537/553757146014/553757146014.pdf>
83. Guiloff, M. (2011). Nueva institucionalidad ambiental: Hacia una regulación deliberativa. *Anuario de derecho público*, 231-242.
84. Gutiérrez, J. (2016). Research lines in data mining in science and engineering applications: State of the art and perspectives. *Pdfs. Semantic Scholar. Org*, 1, 1-17.
85. Gutiérrez Lesmes, O. A., Loba Rodríguez, N. J., & Martínez Torres, J. (2018). Prevalencia del Síndrome de Burnout en profesionales de enfermería de la Orinoquia colombiana. *Universidad y salud*, 20(1), 37-43. DOI: <https://doi.org/10.22267/rus.182001.107> Disponible en: <https://revistas.udenar.edu.co/index.php/usalud/article/view/3333>
86. Hanafizadeh, M. R., Saghaei, A., & Hanafizadeh, P. (2009). An index for cross-country analysis of ICT infrastructure and access. *Telecommunications Policy*, 33(7), 385-405.
87. Hernández Maden, R. (1999). ¿Cómo realizar un diagnóstico logístico de distribución? *Revista de la Sociedad Cubana de Logística*. Disponible en: <http://hmr.ii/10527?=101.08.1>.
88. Hernández Nariño, A. (2010). Contribución a la gestión y mejora de procesos en instalaciones hospitalarias del territorio matancero. (Tesis de Doctorado), Universidad de Matanzas, Matanzas, Cuba. Disponible en: Repositorio de tesis de doctorado Ingeniería Industrial.
89. Hernández Oro, R. M. (2015). Contribución al cálculo y evaluación de la fiabilidad en el diseño de obras y sistemas hidráulicos en Cuba. (Tesis de Doctorado), Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara, Cuba.
90. Hernández Rojas, J. A. (2015). Medición de la dimensión económica del desarrollo local a través de un índice sintético en la provincia Holguín. (Tesis de Doctorado), Universidad de Holguín Oscar Lucero Moya, Facultad de Ciencias Económicas, Departamento de Economía. Disponible en: <https://repositorio.uho.edu.cu/xmlui/handle/uho/3261>
91. Herrera, E. A., & Rodríguez, J. M. (2019). Impactos de los sistemas de gestión ambiental ISO 14001: 2015 en el sector industrial (Doctoral dissertation, Universidad Santiago de Cali). Disponible en: <https://repository.usc.edu.co/handle/20.500.12421/2530>

92. Hewitt, G. M. (1999). Post-glacial re-colonization of European biota. *Biological journal of the Linnean Society*, 68(1-2), 87-112.
93. Higuera Gutiérrez, A., & Rugeles Ferreira, M. A. (2019). Diseño de un Sistema Integrado de Gestión basado en las normas NTC: ISO 9001:2015, 14001:2015 y 45001:2018 para una empresa de construcción, interventoría y consultoría de obras civiles. (Especialización en Gestión Integrada QHSE Cohorte 41), Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia. Disponible en: <http://qhse.com/j.rtmnp.01/40852.2019.08.2>.
94. Hirata, T., Kuremoto, T., Obayashi, M., Mabu, S., and Kobayashi, K. (2015). Time series prediction using DBN and ARIMA, (IEEE edn.), pp. 24-29. DOI: 10.1109/CCATS.2015.15.
95. Hita, F. C., Orayen, R. E., García, I., Arzoz, P. P., & Gárate, M. R. (2009). Propuesta de un método para distribuir un fondo de igualación municipal. In XVI Encuentro de Economía Pública: Granada, Palacio de Congresos. 5 y 6 de febrero de 2009 (p. 106).
96. Huaico-Malhue, A., Pérez-Morales, A., & Daessle, L. W. (2017). Propuesta metodológica prospectiva para la elaboración de un índice sintético de vulnerabilidad hidrogeológica: el caso de estudio de Maneadero en México. *Ambiente y Desarrollo*, 21(41), 107-121.
97. Ibañez, N., Mujica, M., & Castillo, R. (2017). Components of sustainable human development. *Negotium: journal of managerial sciences*, 12(36), 63-77. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7169739>
98. Ilasaca Cahuata, E., Tudela Mamani, JW, Zamalloa Cuba, W., Roque, B., & Fernandez, E. (2018). Generación de indicadores sintéticos de desarrollo sostenible-Perú 2015. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 20 (2), 251-260. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2313-29572018000200009
99. Jaquinet Espinosa, R. M. (2016). Contribución al control de gestión en las instituciones de educación superior a través de la comunicación organizacional. (Tesis de Doctorado), Facultad de Ciencias Económicas e Informática, Universidad de Matanzas, Matanzas, Cuba. Disponible en: Repositorio de tesis de doctorado Ingeniería Industrial.
100. Jiménez, J. (2002). El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones. *Rect@ Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, 1, 28-77.
101. João Fernandes, D. (2016). Procedimiento para el sistema de evaluación del desempeño de los docentes en universidades públicas angolanas. Estudio de

- caso: Universidad José Eduardo dos Santos. (Tesis de Doctorado), Facultad de Ingeniería Industrial y Mecánica. Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara, Cuba.
102. Juárez Romero, O., Cañedo Villarreal, R., & Mendoza, M. D. C. B. (2017). Medición de la calidad de vida mediante índices sintéticos en localidades del municipio de Acapulco, Guerrero, México. *Población y salud en mesoamérica*, 14(2), 40-59. Disponible en: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-02012017000100040
103. Kammoun, S., Re, V., Trabelsi, R., Zouari, K. and Daniele, S. (2018). Assessment of seasonal variations and aquifer vulnerability in coastal aquifers of semi-arid regions using a multi-tracer isotopic approach: the case of Grombalia (Tunisia). *Journal of hydrogeology*, 26 (8), 2575-2594.
104. Kaplan, R. S. & Norton, D. P. (1992). *The Balanced Scorecard: Measures that drive performance*. Harvard Business Review. Enero-Febrero. USA.
105. Kardan Moghaddam, H., Jafari, F. and Javadi, S. (2017). Vulnerability assessment of a coastal aquifer via GALDIT model and comparison with DRASTIC index using quality parameters. *Journal of Hydrological Sciences*, 62 (1), 137-146. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2015.1080827>
106. Kessler J. (1998). *Environmental monitoring and assessment in relation to development objectives*. SNV Netherlands Service for Development Cooperation. AID Environment.
107. Lanfranco, B. A., & Sapriza, G. (2011). The CONEAT index as a measure of productivity and land value (No. 929-2016-74304). *Research in Agricultural and applied economics*. DOI: 10.22004/ag.econ.121684. Disponible en: <https://ageconsearch.umn.edu/record/121684>
108. Lara Galindo, E., Flores Domínguez, Á. D., & Zulaica, M. L. (2018). Evaluación de las condiciones de habitabilidad de la ciudad de Puebla (México), mediante la construcción de un índice sintético. *I+A Investigación + Acción*, 21, 23-42. ISSN: 2250-818X. Disponible en: <http://I+A.me.com/sld.prt=?12954.2250818X.10>
109. Laxe, F. G., Palmero, F. M., & Francos, M. F. (2004). Measuring sustainable development and regional analysis: design and application of a global synthetic index to the Spanish autonomous communities. *Investigaciones Regionales= Journal of Regional Research*, (5), 91-112.
110. León, C., Espejel, I., Bravo, L. C., Fermán, J. L., Graizbord, B., Sobrino, L., & Sosa, J. (2004). El ordenamiento ecológico como un instrumento de política

- pública para impulsar el desarrollo sustentable: caso en el noroeste de México. El manejo costero en México. UAC, SEMARNAT, CETYS-Universidad, UQRoo, 341-352.
111. León, D., & Cárdenas, C. (2020). Latinoamérica y el Caribe: Riqueza Natural y Degradación Ambiental en siglo XXI. Covid19| Serie De Documentos De Política Pública Pnud, (14).
112. Li, T., Wang, Z., & Liu, J. (2020). Evaluation method for impact of jamming on radar based on expert knowledge and data mining. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 14(9), 1441-1450.
113. Liñan Solis, I. L. (2020). Gestión ambiental y conciencia ambiental en la calidad de vida de los pobladores del PJ Nuevo Perú, SJL 2020. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/47216>
114. Llanes Font, M., & Lorenzo Llanes, E. J. (2017). Gestión integrada por procesos. Encadenamiento dinámico de interacciones relevantes para su despliegue / Process integrated management. Dynamic linking of interactions relevant to their deployment. *Ciencias Holguín*, 23(1). Holguín, Cuba. ISSN: 1027-2127. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181549596006>.
115. Llosa, G., & Miller, S. (2005). Using additional information in estimating the output gap in Peru: a multivariate unobserved components approach (No. 2005-0041).
116. Londoño Patiño, J. A. (2020). Productivity-Based Decision Making in Manufacturing SMEs: A Fuzzy Logic Approach. *CEA Journal*, 6(12). Disponible en: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3788194
117. López, D. S. (2006). Data Mining Solutions with Enterprise Miner. RA-MA.
118. López, I., Gutiérrez, V., Collantes, F., Gil, D., Revilla, R., & Gil, J. L. (2017). Developing an indicators plan and software for evaluating Street Cleanliness and Waste Collection Services. *Journal of Urban Management*, 6, 66-79. ISSN: 2226-5856. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jum.2017.06.002>.
119. López, P., & Mateos, P. (2015). La medición de la cohesión territorial a escala regional. Propuesta metodológica y aplicación a Andalucía. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*.
120. López Palomeque, F., Torres Delgado, A., Elorrieta Sanz, B., Font Urgell, X., & Serrano Miracle, D. (2018). Gestión sostenible de destinos turísticos: la implementación de un sistema de indicadores de turismo en los destinos de la provincia de Barcelona. *Polígonos*, 77, 428-461. Barcelona, España. ISSN: 2444-0272. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.21138/bage.2547>.

121. López Sánchez, M. P., Alberich, T., Aviñó, D., García, F. F., Ruiz Azarola, A., & Villasante, T. (2018). Herramientas y métodos participativos para la acción comunitaria. Informe SESPAS 2018. Gaceta Sanitaria, 32, 32-40. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0257-43142015000200008
122. Lucas Molina, B.; Pérez-Albéniz Iturriaga, A., Pedrero, E. F., Sierra, J. O., Martínez, M. L. U., & Rosell, M. S. (2017). Fiabilidad y evidencias de validez de un instrumento para la evaluación de la calidad de los mapas conceptuales. Contextos Educativos. Número Extraordinario 2, 119-130. DOI: <http://doi.org/10.18172/con.3065>. Disponible en: www.coned.archive/issues330245.
123. Madrigal Delgado, G. d. J., Camacho Castro, C., González Franco, R. A., & Bueno Cevada, L. E. (2018). Desempeño fiscal municipal del estado de Sinaloa: Propuesta de índice sintético para evaluaciones fiscales. Economía, sociedad y territorio, 18(57), 359-396.
124. Mantecón Licea, S., Feria Ávila, H., & Mateo Rodríguez, J. M. (2017). Procedimiento evaluativo para unidades de gestión ambiental. Estudio de caso Las Tunas. Ciencias Holguín, 23(4), 84-98. Disponible en: <http://www.ciencias.holguin.cu/index.php/cienciasholguin/article/view/1063>
125. Márquez Escárcega, J. L. (2017). Participación ciudadana en la elaboración de indicadores para la evaluación de la gestión ambiental sostenible. Revista Luna Azul, (45), 252-265. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3217/321753629013.pdf>
126. Marranghello, N. (2005). Redes de petri: Conceitos e aplicações. São Paulo: DCCE/IBILCE/UNESP.
127. Martín, AC, & Barros, MDCP (2015). Design of a Living Conditions Index and classification of the national territory. Cuban Journal of General Comprehensive Medicine, 31 (3), 323-332.
128. Martín, P. G., de Pascual, A. D., Lezama, E. T., & Olmos, E. G. (1994). Una aplicación del análisis de componentes principales en el área educativa. Economía, 19(9), 55-72.
129. Martínez Luna, G. (2011). Minería de datos: cómo hallar una aguja en un pajar. Ingenierías, 14(53), 55-63.
130. Martínez, R. Q. (2009). Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de América Latina y el Caribe. Santiago de Chile.
131. Marulanda Grisales, N. (2017). Análisis de Componentes Principales sobre la adopción de Sistemas de Gestión Ambiental en Instituciones de Educación

- Superior. Revista ESPACIOS, 38(52). Disponible en: <http://www.revistaespacios.com/a17v38n52/17385223.html>
132. Massolo, LA (2015). Introducción a las herramientas de gestión ambiental. Serie: Libros de Cátedra.
133. Mastrandrea, A., & Ángeles, G. (2020). Aplicación de un índice de vulnerabilidad social: el caso de la ciudad de Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires (Argentina). *Geografía y Sistemas de Información Geográfica*, Año 12, N° 16 (2020). Disponible en: <https://ri.unlu.edu.ar/xmlui/handle/rediunlu/802>
134. Maya, M. T., Ramírez, M. P. M., Ramírez, C. C., & Yepes, C. A. Z. (2018). El procedimiento sancionatorio ambiental: análisis de una metodología que sigue en construcción. *Revista de la Facultad de Derecho y Ciencias Políticas*, 48(128), 245-262. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-38862018000100245
135. Medina León, A., Nogueira Rivera, D., Sarría Marrero, Y. L., Hernández Nariño, A., & Nogueira Rivera, C. (2005). El control de gestión y su dimensión económica para el sector hotelero. Matanzas, Cuba. *Revista Retos Turísticos*. 4(3), 7-12. ISSN: 959-16-0295.
136. Medina León, A., Nogueira Rivera, D., Hernández Nariño, A., & Vitier Moya, J. (2010). Relevancia de la Gestión por Procesos en la Planificación Estratégica y la Mejora Continua. *Revista EIDOS, Universidad Tecnológica Equinoccial*, 2, 65-72. Quito, Ecuador. ISSN: 1390-5007. Disponible en: [http://ute.ec/EIDOS\\$.589461156](http://ute.ec/EIDOS$.589461156).
137. Medina León, A., Nogueira Rivera, D. & Sánchez Macías, A. (2020). La gestión del conocimiento y los indicadores integrales para la gestión y mejora de procesos. Universidad Autónoma de San Luis Potosi, UASLP. ISBN: 978-607-535-156-8
138. Medina León, A., Piloto Fleitas, N., Nogueira Rivera, D., Hernández Nariño, A., Ricardo Alonso, A., & Viteri Moya, J. (2011). Estudio de la construcción de índices integrales para el apoyo al Control de Gestión Empresarial. *Enfoque UTE*, 2(1), 1-38. *Revista EÍDOS*. Número 3. ISSN: 2043-6089.
139. Medina León, A., Ricardo Alonso, A., Piloto-Fleitas, N., Nogueira Rivera, D., Hernández Nariño, A., & Cuétara Sánchez, L. (2014). Índices integrales para el control de gestión: consideraciones y fundamentación teórica. *Ingeniería Industrial*, XXXV. La Habana, Cuba. ISSN: 1815-5936. Disponible en: <http://ii.edu.cu/11579.2014.1>.

140. Medina Nogueira, D. (2016). Instrumental metodológico para gestionar el conocimiento mediante el observatorio científico. (Tesis de Doctorado), Facultad de Ciencias Económicas e Informática, Universidad de Matanzas, Matanzas, Cuba. Disponible en: Repositorio de tesis de doctorado Ingeniería Industrial.
141. Meline Cantar, N. M., & Zulaica, M. L. (2017). Evaluación preliminar de la sostenibilidad ambiental y urbana de la ciudad de Olavarría. Editorial: Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño. Revista: Investigación + acción. ISSN: 1850-1117. Disponible en: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/80737>
142. Miller, H. J., Jaegal, Y., & Raubal, M. (2019). Measuring the geometric and semantic similarity of space–time prisms using temporal signatures. *Annals of the American Association of Geographers*, 109(3), 730-753. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/24694452.2018.1484686>
143. Miranda Cuéllar, R. L., Pell del Río, S. M., & Fernández Olivera, J. (2016). Proceso de evaluación del desempeño ambiental basada en indicadores sintéticos en Cuba. *Revista Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, IV(1), 1-25. Disponible en: <http://www.dilemascontemporaneoseduccionpoliticayvalores.com/index.php/dilemas/article/view/337/704>
144. Miranda Cuéllar, R. L., Reyes Acuña, S., Gómez País, G. D. L. M., & Goicochea Cardoso, O. C. (2019). Metodología para la realización de un diagnóstico de la gestión de indicadores ambientales en la administración pública. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(1), 71-87. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0122-34612019000100071&script=sci_abstract&tIng=en
145. Morales Jacob, F. E. (2004). Aplicación e interpretación de técnicas de reducción de datos según escalamiento óptimo:(Análisis de correspondencia múltiple y análisis de componentes principales categóricos). Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/113469>
146. Morales Plaza, S. P. (2017). Descripción metodológica del análisis conjunto con perfiles completos.
147. Morales Vallejo, P. (2013). El Análisis Factorial en la construcción e interpretación de tests, escalas y cuestionarios. Madrid: Universidad Pontificia Comillas.
148. Múnera Espinal, H. D. (2011). Indicadores de Gestión ambiental. Disponible en: <http://app1.semarnat.gob.mx>

149. Muñiz, J. 1998. Validez. Teoría clásica de los tests. Madrid, España, Ed. Pirámide. 5ta Edición. 529 pp.
150. Neculqueo, M. E. (2010). Los indicadores ambientales como parámetros clave de la sostenibilidad.
151. Negrín Sosa, E. (2003). El mejoramiento de la administración de operaciones en empresas de servicios hoteleros. (Tesis de Doctorado), Universidad de Matanzas, Matanzas, Cuba. Disponible en: Repositorio de tesis de doctorado Ingeniería Industrial.
152. Nogueira Rivera, D. (2002). Modelo conceptual y herramientas de apoyo para potenciar el control de gestión en las empresas cubanas. (Tesis de Doctorado), Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos", Matanzas, Cuba. Disponible en: Repositorio de tesis de doctorado Ingeniería Industrial.
153. Nury, A.H., Hasan, K., and Alam, M.J.B. (2017). Comparative study of wavelet-ARIMA and wavelet-ANN models for temperature time series data in northeastern Bangladesh', *Journal of King Saud University-Science*, 29, (1), pp. 47-61. DOI: 10.1016/j.jksus.2015.12.002.
154. Oded, M., & Lior, R. (2010). *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*. New York. Disponible en: <https://www.springer.com/gp/book/9780387098227>.
155. OECD (1998): Recommendation of the Council on Environmental Information (Adopted by the Council at its 922nd Session on 3 April 1998). Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico, París.
156. Olivares, B. (2014). Aplicación del análisis de componentes principales (ACP) en el diagnóstico socioambiental. Caso: Sector Campo Alegre, municipio Simón Rodríguez de Anzoátegui. *Multiciencias*, 14(4), 364-374.
157. Ortecho, E. M. A. (2018). Modelo de mejora ambiental para la producción más limpia de cobre, y su influencia en la gestión empresarial con ecuaciones estructurales. *Industrial data*, 21(2), 63-72. Disponible en: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/816/81658967010/81658967010.pdf>
158. Ossa Giraldo, E. U. (2014). Methodology to identify the significant variables that optimize the fiscal performance of municipalities in Antioquia: an econometric approach (Doctoral dissertation, Universidad EAFIT). Disponible en: <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/2951>
159. PACC, Grupo de Expertos (2009) Supplemental Report of the PACC Group of the Climate Investment Fund. Washington, United States. Disponible en: <http://www.sopac.org/Projects/Evi/index.html>
160. Paez, D. & Fillion, Y. (2017). Generation and validation of synthetic WDS case studies using graph theory and reliability indexes. *Procedia Engineering*, 186. 143-

151. ISSN: 1877-7058 DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.220. Disponible en: www.sciencedirect.com.
161. Palomeque, F. L., Delgado, A. T., Urgell, X. F., & Miracle, D. S. (2018). Gestión sostenible de destinos turísticos: la implementación de un sistema de indicadores de turismo en los destinos de la provincia de Barcelona. *Boletín de la asociación de geógrafos españoles*, (77), 428-461. ISSN 0212-9426, ISSN-e 2605-3322. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6554915>
162. Parra, F. (2019). *Statistics and Machine Learning with R. Bookdown*. Disponible en: <https://bookdown.org/content/2274/series-temporales.html>
163. Parra, J.A.P., Cruz, O.A.T., and Méndez, Y.L.A. (2020). 'Dispositivo basado en modelo arima para predicción de variables ambientales (temperatura, humedad, velocidad del aire) en el área agrícola del departamento del Meta', *Revista GEON (Gestión, Organizaciones y Negocios)*, 7(2), 1-12. DOI:10.22579/23463910.193.
164. Pearce D, T. R. (1995). *Economía de los Recursos Ambientales y del Medio Ambiente*. España: Celeste.
165. Pena, E.H., de Assis, M.V., and Proença, M.L. (2013). Anomaly detection using forecasting methods arima and hwds. (IEEE, 2013, edn.), pp. 63-66 DOI: 10.1109/SCCC.2013.18.
166. Perera Conde, L., Nogueiras Valdés, A., & Alcober Álvarez, R. R. (2021). Indicadores para la medición de los costos ambientales en entidades de alojamiento turístico: Una necesidad ante la sostenibilidad del uso de los recursos. *Explorador Digital*, 5(1), 185-200. Disponible en: <https://doi.org/10.33262/exploradordigital.v5i1.1497>.
167. Pérez, C.A., Burbano, C., & Londoño, H. (2017). Regions for living Departmental Synthetic Quality of Life Index. Disponible en: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/90257/>
168. Pérez García, V. E., Peral, F. J. B., González, M., Casas, F. M. G., Lozano-Oyola, M., García, F. P., & Fernández, R. C. (2009). Evaluación de la sostenibilidad del turismo rural mediante indicadores sintéticos. *Investigación operacional*, 30(1), 40-51. ISSN-e 0257-4306. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2997236>
169. Pérez García, W. (2013). *Modelo de gestión integrada de la calidad y del medioambiente en los órganos cubanos de gobierno local*. (Tesis de Doctorado), Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, La Habana, Cuba. Disponible en: Repositorio de tesis de doctorado Ingeniería Industrial.
170. Pérez León, V. E. (2010). *Procedimiento de agregación para la construcción de indicadores sintéticos de sostenibilidad en las zonas de turismo de naturaleza en*

- Cuba. (Tesis de Doctorado), Universidad de Pinar del Río " Hermanos Saíz Montes de Oca", Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Centro de Estudios de Gerencia, Desarrollo Local y Turismo.
171. Pérez López, C., & Santín González, D. (2007). Data mining, tools and technics. Editorial Paraninfo.
172. Pérez Martínez, L., Cabrera Hernández, J.A., Alfonso Martínez, A.A., Sánchez Roque, O. (2019). Ordenamiento ambiental y gestión costera integrada: experiencias y retos en el norte de la provincia de Matanzas (Cuba). Editorial Educosta, Colombia. Disponible en: <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/6032>.
173. Pérez Martínez, L. (2019). Observatorio ambiental COSTATENAS. XI Taller Internacional "La gestión y la Educación Ambiental para el Desarrollo Sostenible – EDUCAMBIE". IX Convención Científica Internacional "Universidad Integrada e Innovadora", CIUM. Varadero, Matanzas, Cuba. ISBN: 978-959-16-4279-0.
174. Pérez Martínez, L., Cabrera Hernández, J. A., Berrio Turiño, E. J. (2019-a). Indicador sintético para la Gestión Ambiental Empresarial. III Encuentro Bilateral Cuba-México. Ciencias de la educación y ciencias Administrativas. Varadero, Matanzas, Cuba.
175. Pérez Martínez, L., Cabrera Hernández, J. A., Berrio Turiño, E. J. (2019-b). Índice sintético para la Evaluación Gestión Ambiental Empresarial. III Congreso Internacional de Marketig, Desarrollo Local y Turismo, CE-GESTA. Pinar del Río, Cuba.
176. Pérez Martínez, L., Cabrera Hernández, J. A., Rodríguez Blanco, D. (2016). Las zonas costeras como interfase universidad-gestión: Caso Bahía de Matanzas como oportunidad. Revista Congreso Universidad. Disponible en: <http://revista.congresouniversidad.cu/index.php/rcu/article/view/775>
177. Pérez Martínez, L., García del Toro, J.L. (2017). Autómata probabilístico para el análisis de sentimientos. XIX Encuentro Internacional "La matemática, la estadística y la computación: enseñanza y aplicaciones", MATECOMPU. Varadero, Matanzas, Cuba. ISBN: 978-959-16-3671-3.
178. Pérez Martínez, L., Garriga González, L., & Benítez Miranda, M. (2015). Sistema de predicción financiera para hoteles mediante Redes Neuronales Artificiales. Retos Turísticos, 14(1).
179. Pérez Martínez, L., Hernández-Carrión, R. (2019). Sistema de predicción financiera para hoteles mediante Redes Neuronales Artificiales. XII Encuentro Internacional de Ciencias Empresariales y Turismo CIEMPRESTUR. IX

- Convención Científica Internacional "Universidad Integrada e Innovadora", CIUM. Varadero, Matanzas, Cuba. ISBN: 978-959-16-4279-0.
180. Pérez Martínez, L., Naranjo-Rey, M. A., Santos-Pérez, O., Cabrera-Hernández, J. A., & Nogueira-Rivera, D. (2021). Algoritmos de minería de datos para la predicción del comportamiento de indicadores ambientales. *DYNA*, 88 (219), 228-236. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/95018>
181. Pérez Martínez, L., Rivero Muñiz, O. (2017). Sistema informático para la automatización y la predicción de indicadores económicos utilizando Redes Neuronales Artificiales. XIX Encuentro Internacional "La matemática, la estadística y la computación: enseñanza y aplicaciones", MATECOMPU. Varadero, Matanzas, Cuba. ISBN: 978-959-16-3671-3.
182. Pérez Martínez, L., Tápanes Suárez, E., Santos Pérez, O., Cabrera Hernández, J.A., Nogueira Rivera, D. (2021). Procedimiento para Índice Sintético de Gestión Ambiental: validación con minería de datos. *Revista Ingeniería Industrial*, 42(2). ISSN 1815-5936. Disponible en: <https://rii.cujae.edu.cu/index.php/revistaind/article/view/1111>.
183. Peteiro de Bureau Veritas, D. R. (2010). Gestión del Conocimiento: el capital humano como pilar clave para la innovación en la empresa. Resumen de conferencia. Cátedra de Innovación. Disponible en: <http://www.catedrainnovacion.es/noticias/conferencia-gesti%C3%B3n-del-conocimiento-el-capital-humano-como-pilar-clave-para-la-innovaci%C3%B3n-?page=6>
184. Pimentel de Oliveira Santos, D. (2020). Design of a system of indicators, based on the 17 Sustainable Development Goals (UN), for the creation of a synthetic indicator in coastal tourist destinations. Disponible en: <https://roderic.uv.es/handle/10550/73141>
185. Pizarro, J. E., & Guirao, P. M. (2019). Análisis del riesgo de exclusión social en el medio rural: el índice Z como solución «lowcost» a la falta de indicadores sintéticos municipales. *Cuadernos Geográficos*, 58(3), 103-124. Disponible en: <https://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/8636>
186. Portal Boza, M., Bernal Escoto, B. E., & Feitó Madrigal, D. (2016). Evaluación de la gestión económico-financiera en microempresas mexicanas.
187. PNUMA, 2001. Indicadores GEO, Perspectiva del Medio Ambiente Mundial, Nairobi.
188. QuanDare. (6 de noviembre de 2021). Artificial Intelligence Random forest vs Simple tree. Disponible en: <https://quantdare.com/random-forest-vs-simple-tree/>.

189. Quiroga Juárez, C. A., & Villalobos Escobedo, A. (2015). Analysis of Stock Market Behavior of the Major Financial Exchanges Worldwide Using Multivariate Analysis (Principal Component Analysis PCA) for the Period 2011 to 2014. *Revista CEA*, 1(2). Disponible en: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3520246
190. Ramírez, Y. P., Rodríguez, M. E., & Rodríguez, I. B. (2016). Criterios Generales de la Gestión Ambiental en Cuba.
191. Ramos Alfonso, Y. (2015). Modelo de gestión de reservas de eficiencia basado en los costos de la calidad con enfoque generalizador. (Tesis de Doctorado), Facultad de Ciencias Económicas e Informática, Universidad de Matanzas, Matanzas, Cuba. Disponible en: Repositorio de tesis de doctorado Ingeniería Industrial.
192. Renté Labrada, R. M., Valdivia Mesa, A., Vega Almaguer, M., & González Hidalgo, G. E. (2021). Computación con palabras en la evaluación del Diseño como instrumento de la Gestión Ambiental. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 15(1), 1-19. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2227-18992021000100001
193. Rey, C. (2008). Sistemas de Gestión Ambiental Norma ISO 14001 y Reglamento EMAS. Master en ingeniería y gestión ambiental). EOI Escuela de Negocios, España.
194. Reyes-Chapman, B., & Ochoa-Ávila, M. B. (2019). Procedimiento sobre gestión ambiental para el Centro de Información y Gestión Tecnológica. *Ciencias Holguín*, 25(2), 83-96. Disponible en: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/1815/181559111007/181559111007.pdf>
195. Ricardo Cabrera, H., Medina León, A., Abab Puente, J., Nogueira Rivera, D., & Núñez Chaviano, Q. (2015). La integración de Sistemas de Gestión Empresariales, conceptos, enfoques y tendencias. *Ciencias de la Información*, 46(3), 3-8. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1814/181443340001.pdf>
196. Rico Gaviria, S. (2020). Automatización y optimización del modelo de indicadores de gestión ambiental para la compañía Invesa SA. Disponible en: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/15961>
197. Rico, M., & Gómez-Limón, J. A. (2011). Propuesta metodológica para la construcción de indicadores sintéticos de igualdad de género. El caso del medio rural de Castilla y León. *Revista internacional de Sociología*, 69(1), 253-286.
198. Rico, S. E. P., Leal, J. E. F., & Blasco-Blasco, O. (2015). Construcción de indicadores sintéticos basados en juicio experto: Aplicación a una medida integral de la excelencia académica. *Rect@*, 16(1), 51.

199. Rios-Insua, S. A., & Jiménez, A. (2002). La teoría de la utilidad para modelos de preferencias en decisión multiatributo. *Toma de Decisiones con Criterios Múltiples*.
200. Rivas Marín, MI (2011). Modelo de sistema de gestión ambiental para la formación universitaria ambientalmente sostenible en Colombia; Modelo de sistema de gestión ambiental para formar universidades ambientales sostenibles en Colombia. *Gestión y Ambiente*.
201. Rivera-Pabón, J. A., & Senna, D. C. (2017). Análisis de unidades de paisaje y evaluación de impacto ambiental como herramientas para la gestión ambiental municipal. Caso de aplicación: municipio de Tona, España. *Revista Luna Azul*, (45), 171-200. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3217/321753629010.pdf>
202. Rodríguez-Becerra, M., Espinoza, G., & Wilk, D. (2002). *Gestión ambiental en América Latina y el Caribe. Evolución, tendencias y principales prácticas*. Washington, DC: Banco Interamericano de Desarrollo.
203. Rodríguez-Rodríguez, D., & Martínez-Vega, J. (2012). Proposal of a system for the integrated and comparative assessment of protected areas. *Ecological indicators*, 23, 566-572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.05.009>
Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X12002087>
204. Rodríguez, J. (2010). *Fundamentos de minería de datos (Primera edición ed.)*. Bogota, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
205. Rodríguez Sánchez, Y. (2017). *Contribución a la planificación de la capacidad en los procesos asistenciales en la Atención Primaria de Salud*. (Tesis de Doctorado), Universidad de Matanzas Sede "Camilo Cienfuegos", Matanzas, Cuba. Disponible en: Repositorio de tesis de doctorado Ingeniería Industrial.
206. Roffe, I. (1997). *Developing a dynamic in a learning innovation. Quality Assurance in Education*.
207. Roget, F. M., de Miguel Domínguez, J. C., & Fernández, P. M. (2005). El análisis envolvente de datos en la construcción de indicadores sintéticos. Una aplicación a las provincias españolas. *Estudios de Economía Aplicada*, 23(3), 753-771.
208. Rojas, F. M., & Gomez, C. (2014). Funcionalidades de la minería de datos. *Ingeniería y Región*, 12, 31-40.
209. Roncero, C. 2015. La validación de instrumentos psicométricos: un asunto capital en la salud mental. *Revista Salud Mental*, 38 (4), 235-236. ISSN: 0185-3325. DOI: 10.17711/SM.0185-3325.2015.032. Disponible en: www.revsaludmental.com/articles/searchID.

210. Rouhiainen, L. (2018). *Artificial Intelligence*. Madrid: Alienta Editorial.
211. Rubio Calduch, V. (2001). *La Gestión Ambiental en la pequeña y mediana empresa*. Departamento de Industria y Medio Ambiente. Valencia, España. Disponible en: <http://www.ces.gva.es/pdf/conferencias/02/3.pdf>
212. Sáez Mosquera, I. 2008. *Procedimientos y arquitectura de apoyo para la asistencia decisional en procesos estratégicos de Gestión Logística*. (Tesis de Doctorado), Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara, Cuba.
213. Saisana, M., & Tarantola, S. (2002). *State-of-the-art report on current methodologies and practices for composite indicator development*, 214: Citeseer.
214. Sánchez López, A., Cruz-Gutiérrez, V., Posada-Zamora, M. A., Torrijos M. T., Osorio Lama, A. (2016). *Study of principal component analysis in air quality databases*. *Res. Comput. Sci.*, 120, 9-19.
215. Sánchez-Villena, Andy. (2019). *Uso de programas estadísticos libres para el análisis de datos: Jamovi, Jasp y R*. *Revista Perspectiva*, 20(1), 112-114. DOI: <https://doi.org/10.33198/rp.v20i1.00026>.
216. Santos Pérez, O. (2020). *Instrumento metodológico para la gestión de accesibilidad y movilidad en centros históricos cubanos. Aplicación en la ciudad de Matanzas*. (Tesis de Doctorado), Facultad de Ciencias Empresariales, Universidad de Matanzas, Matanzas, Cuba. Disponible en: Repositorio de tesis de doctorado Ingeniería Industrial.
217. Shah, R. (2004). *Assessment of Sustainability Indicators*. Recuperado el marzo de 2019, de *Indicators of Sustainable Development: Recent Developments and Activities*: http://www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/scopepaper_2004.pdf
218. Schmidt, F., Suri-Payer, F., Gulenko, A., Wallschläger, M., Acker, A., and Kao, O. (2016). *Unsupervised anomaly event detection for cloud monitoring using online arima*, (IEEE, 2018, edn.), 71-76. DOI: 10.1109/UCC-Companion.2018.00037.
219. Seclen Luna, J. P. & Ponce Regalado, F. (2017). *Innovation in Peru: a reflection based on synthetic indicators*. 360: *Revista de Ciencias de la Gestión*, 2, 120-132. Disponible en: <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/360gestion/article/view/19054>
220. Spairani Berrio, S. & Roca Cladera, J. (2020). *Preferencias de la demanda sobre los materiales de construcción del inmueble residencial: caso de estudio con el Análisis Conjunto Adaptativo*. Disponible en: <https://revistes.upc.edu/index.php/ACE/article/view/9245>

221. Sutton Charani, S. D. (2013). Learning Decision Trees from Uncertain Data with an Evidential EM Approach. International Conference on Machine Learning and Applications.
222. StatisticsHowTo.com: Elementary Statistics for the rest of us! Disponible en: <https://www.statisticshowto.com/mean-absolute-percentage-error-mape/>
223. Suárez Mella, R. P., de la Rosa Betancourt, L., Jiménez Valero, B., & Toyos Brito, A. (2001). Gestión de vitalidad en entornos competitivos. (Universitaria Ed.). Ciudad de Matanzas, Cuba. ISBN: 978-959-16-1026-3. Disponible en: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ar/legalcode>.
224. Sydsaeter, K., & Hammond, P. J. (1995). Mathematics for economic analysis (No. HB135 S98).
225. Tapia López, J. E. (2007). El escalamiento óptimo con base en el análisis de componentes principales no lineales para la construcción de índices de condiciones de vida y socioeconómicos. Aplicación en el ámbito nacional (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2007). Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/537>
226. Terrádez Gurrea, M. (2000). Análisis de componentes principales. Proyecto e-Math Financiado por la Secretaría de Estado de Educación y Universidades (MECD).
227. Tristán López, A. y Pedraza Corpus, N. Y. (2017). La Objetividad en las Pruebas Estandarizadas. Revista Iberoamericana de Evaluación Educativa, 10(1), 11-31. ISSN: 1989-0397. DOI: <https://doi.org/10.15366/riee2017.10.1.001>. Disponible en: www.rinace.net/riee/
228. Tsaur, S. H., Lin, Y. C., & Lin, J. H. (2006). Evaluating Ecotourism Sustainability from the Integrated Perspective of Resource, Community and Tourism. Tourism Management, 27, 640-653. Taipei, Taiwan. ISSN: 0261-5177. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2005.02.006>.
229. Tundidor Montes de Oca, L., Nogueira Rivera, D., & Medina León, A. (2018). Organización de los sistemas informativos para potenciar el control de gestión empresarial. Cofin Habana, 12 (1), 88-110. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2073-60612018000100007
230. Ugwu, O. O., Kumaraswamy, M. M., Wong, A., & Ng, S. T. (2006). Sustainability Appraisal in Infrastructure Projects (SUSAIP) Part 1. Development of Indicators and Computational Methods. Automation and Construction, 15, 239-251. Hong Kong, China. ISSN: 0926-5805. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2005.05.006>.

231. Urrutia Egaña, M.; Barrios Araya, S., Gutiérrez Núñez, M., & Mayorga Camus, M. (2014). Métodos óptimos para determinar validez de contenido. *Educación Médica Superior*, 28(3), 547-558. ISSN: 8924471-2. Disponible en: <http://scielo.sld.cu>.
232. Valle Barra, M. (2005). Modelo de gestión universitaria basado en indicadores por dimensiones relevantes. *Revista Ibero-Americana de Educación*, 35(8), 18-25. Chile. ISSN: 1681-5653. Disponible en: <http://risc.doolde.riae/15844.852.10>.
233. Vallejos Romero, A. (2005). Los conflictos ambientales en una sociedad mundializada. Algunos antecedentes y consideraciones para Chile. *Revista Líder*, 10(13), 193-214. Disponible en: <https://revistaliderchile.com/index.php/liderchile/article/view/212>
234. Vega Clavijo, LT, Prías Caicedo, OF, & Sierra Vargas, FE (2016). Matriz de selección de energías alternativas basada en análisis multi-atributo para la conservación de pescado. *Ingeniería Mecánica*, 19 (2), 110-118. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59442016000200006&script=sci_arttext&tlng=pt
235. Vicente, P., Marques, C., & Reis, E. (2021). Willingness to pay for environmental quality: the effects of pro-environmental behavior, perceived behavioral control, environmental activism, and educational attainment. *SAGE Open*. 11 (4), 21582440211025256. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/21582440211025256>
236. Vilariño Corella, C.M. (2012). Dinamización de la Gestión Ambiental desde la estrategia empresarial. Caso Empresa del Níquel Comandante Ernesto Che Guevara. *Revista CienciasHolguín*, 17(1). Disponible en: <http://www.ciencias.holguin.cu/index.php/cienciasholguin/article/view/714>
237. Villacreses Cajamarca, C. J. (2019). Evaluación de indicadores sintéticos de desarrollo sostenible para destinos turísticos consolidados caso Mindo (PICHINCHA, ECUADOR). (Facultad de Comunicación Social, Tesis de Diploma), Universidad Central del Ecuador, Quito. Disponible en: <http://uce.cu/doodle.1222688822234895.pdf>.
238. Viloría Villegas, M. I., Cadavid, L., & Awad, G. (2018). Methodology for environmental impact assessment of infrastructure projects in Colombia. *Science and Engineering Neogranadina*, 28(2), 121-156. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0124-81702018000200121&script=sci_abstract&tlng=en
239. Viteri Moya, J. R. (2011). Modelo y procedimientos para gestionar la responsabilidad social universitaria. (Tesis de Doctorado), Facultad de Ciencias

- Empresariales, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, Matanzas, Cuba. Disponible en: Repositorio de tesis de doctorado Ingeniería Industrial.
240. Vizcaíno, M. E. L., Liste, A. V., & Fernández, P. S. (2007). Valoración y medida del bienestar municipal mediante indicadores sintéticos: aplicación a los ayuntamientos gallegos. In Actas del XXX Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa y de las IV Jornadas de Estadística Pública (p. 279). Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3151968>
241. Wackernagel, M., & Rees, W. (1996). Our Ecological Footprint, reducing human impact on the earth. Canada.
242. Walden, C. S., Samaniego, M. L. O., & Gavilanes, J. M. (2017). Índice de calidad ambiental urbana de Cuenca. Universidad-Verdad, (73), 65-77. Disponible en: <https://universidadverdad.uazuay.edu.ec/article/view/38>
243. Wang, H., Huang, J., Zhou, H., Zhao, L., and Yuan, Y. (2019). An integrated variational mode decomposition and arima model to forecast air temperature', Sustainability, 11, (15), 4018. DOI:10.3390/su11154018.
244. Xu, G., Cheng, Y., Liu, F., Ping, P., and Sun, J. (2019). A Water Level Prediction Model Based on ARIMA-RNN'. (IEEE, 2019, edn.), 221-226. DOI: 10.1109/BigDataService.2019.00038.
245. Yengle Ruiz, C. (2012). Application of principal component analysis as a technique to obtain synthetic environmental quality indexes. UCV-SCIENTIA, ISSN: 2077-172X,ISSN-e: 2410-891X, Vol(2), 145-153. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4369401>
246. Zabala Jaramillo, W. J. (1992). Los indicadores de gestión. España.
247. Zulaica, M. L., & Tomadoni, M. M. (2015). Indicadores de sostenibilidad ambiental en el periurbano de la ciudad de Mar del Plata, Argentina. Editorial: Universidad Complutense de Madrid. Revista: Anales de Geografía. ISSN: 0211-9803. e-ISSN: 1988-2378. Disponible en: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/62046>

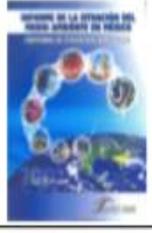
ANEXOS

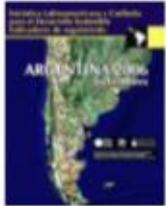
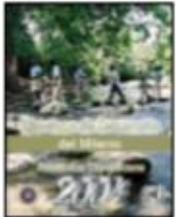
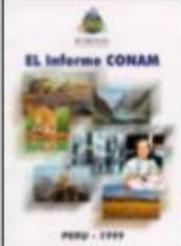
Anexo I.1. Vínculos y publicaciones de las principales iniciativas de indicadores ambientales.

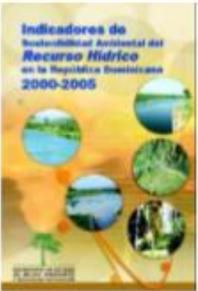
América Latina y el Caribe

Cuadro A. I.1 (a). Vínculos y publicaciones de las principales iniciativas de indicadores ambientales. América Latina y el Caribe.

País	Sistema de Indicadores	IMG. Sist. de Indicadores	Actores relevantes	Publicaciones	IMG. Publicaciones
Venezuela	IDS (Comisión de Desarrollo sostenible)	http://www.mam.gov.ve/	Ministerio del Ambiente	Reporte del Estado del Ambiente (1996). Centro de Estadísticas e Información ambiental. (Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales Renovables – ya no existe)	
Chile	Indicadores regionales de desarrollo CONAMA Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA).	 www.sinia.cl	Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA).	Quiroga, Rayén; (1998), "Indicadores Regionales de Desarrollo CONAMA", Comisión Nacional del Medio Ambiente, Documento de Trabajo N° 7, Serie Economía Ambiental", Chile.	
Costa Rica	Sistema de Indicadores sobre Desarrollo Sostenible (SIDES)	 www.mideplan.go.cr/sides/index.html	Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica		
Colombia	Sistema de Indicadores de Sostenibilidad Ambiental (SISA)	 www.minambiente.gov.co/sisa/	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.	Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - PNUD "Sistema de Indicadores de Sostenibilidad Ambiental en el ámbito Nacional – Avances y Perspectivas". Colombia (sólo versión digital)	
Nicaragua	Indicadores Ambientales de Nicaragua Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA).	 www.sinia.net.ni/indicadores/intro.htm	Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales.	Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales, (2004), "Indicadores Ambientales de Nicaragua, volumen 1", Nicaragua.	
México	Indicadores Básicos de Desempeño Ambiental de México, 2005 Sistema Nacional de Información		Secretaría del medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2005), "Indicadores Básicos de Desempeño Ambiental de México", México.	

País	Sistema de Indicadores	IMG. Sist. de Indicadores	Actores relevantes	Publicaciones	IMG. Publicaciones
	<p><i>Ambiental y de Recursos Naturales – SNIARM -</i></p>	 <p>http://portal.semarnat.gob.mx/semarnat/portal/</p> <p>http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores04/index.htm</p>		<p>Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - UNDP (2005), "Informe de la Situación del Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales 2005", México.</p> <p>Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2002), "Informe de la situación del Medio Ambiente en México 2002", México.</p> <p>Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (1999), "Estadísticas del Medio Ambiente, México 1999", México.</p> <p>Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (1997), "Estadísticas del Medio Ambiente, México 1997", México.</p>	 
	<p>Indicadores de Desarrollo Sustentable, (INEGI-SEMARNAP, 2000)</p>	 <p>http://www.ine.gob.mx/</p>	<p>Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)</p> <p>Instituto Nacional de Ecología (INE).</p>	<p>Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), Instituto Nacional de Ecología (INE), (2000), "Indicadores de Desarrollo Sustentable", México. http://www.ine.gob.mx/publicaciones/new_consultaListaPub.php</p>	
	<p>Sistema de Indicadores para la Evaluación del Desempeño Ambiental de México</p>	 <p>http://www.ine.gob.mx/</p>	<p>Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)</p> <p>Instituto Nacional de Ecología (INE).</p>	<p>Instituto Nacional de Ecología –INE, (1998). "Avances en el Sistema de Indicadores para la Evaluación del Desempeño Ambiental en México 1997" http://www.ine.gob.mx/publicaciones/new_consultaListaPub.php</p>	
<p>México</p>		 <p>http://www.ine.gob.mx/</p>	<p>Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)</p> <p>Instituto Nacional de Ecología (INE).</p>	<p>Instituto Nacional de Ecología –INE, (2000). Indicadores para la Evaluación del Desempeño Ambiental en México. Reporte 2000. http://www.ine.gob.mx/publicaciones/new_consultaListaPub.php</p>	

País	Sistema de Indicadores	IMG. Sist. de Indicadores	Actores relevantes	Publicaciones	IMG. Publicaciones
Argentina	Sistema de Indicadores sobre Desarrollo Sostenible República de Argentina, (SIDSA).	 http://www.medioambiente.gov.ar	<p>Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (Área de Indicadores de Desarrollo Sostenible y Estadísticas Ambientales)</p> <p>Ministerio de Salud y Ambiente de la Nación.</p> <p>Red Nacional de Indicadores de Desarrollo Sostenible</p>	<p>Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Ministerio de Salud y Ambiente de la Nación (2005). "Sistema de Indicadores sobre Desarrollo Sostenible República de Argentina". Argentina. http://www.medioambiente.gov.ar/archivos/web/Indicadores/File/Sidsa%20Libro%20Final_1.pdf</p>	
	Indicadores ILAC		<p>PNUMA</p> <p>Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable</p> <p>Ministerio de Salud y Ambiente de la Nación.</p>	<p>Argentina 2006. Indicadores. Iniciativa Latinoamericana y Caribeña para el Desarrollo Sostenible Indicadores de seguimiento. PNUMA</p>	
República Dominicana	Estadísticas Ambientales	 http://www.medioambiente.gov.do/cms/	<p>Comisión Presidencial para los OM,</p> <p>Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales</p>	<p>Secretaría de Estado del Medio Ambiente y recursos Naturales; (2004). "Objetivos de Desarrollo del Milenio. República Dominicana, 2004". Secretaría del Estado del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Santo Domingo.</p>	
	Sistema Nacional de Información sobre el Medio Ambiente.	http://www.medioambiente.gov.do/cms/		<p>Secretaría de Estado del Medio Ambiente y Recursos Naturales; (2004). "Estadísticas Ambientales de América Latina y el Caribe. Caso: República Dominicana". Secretaría de Estado de medio Ambiente y Recursos Naturales. Dirección Sectorial de Planificación y Programación. Santo Domingo, República Dominicana.</p>	(escanear)
Perú	Sistema Nacional de Información Ambiental	 http://www.conam.gob.pe/sinia/index2.htm	Consejo Nacional del Medio Ambiente		

Pais	Sistema de Indicadores	IMG. Sist. de Indicadores	Actores relevantes	Publicaciones	IMG. Publicaciones
Brasil	Indicadores de Desarrollo Sostenible		Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (Ministerio de Planeamiento, Ordenamiento y Gestión)	Indicadores de Desenvolvimento Sustentável - Brasil 2004 (IBGE-MMA, 2004)	
		http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/ids/default.shtm?c=1		Indicadores de Desenvolvimento Sustentável - Brasil 2002 (IBGE-MMA, 2002)	
República de Panamá	Indicadores Ambientales de la República de Panamá	 http://www.anam.gob.pa/indicadores/index.htm	Autoridad Nacional del Ambiente (2006). "Indicadores Ambientales de la República de Panamá, 2006". República de Panamá.		
República Dominicana	Indicadores de Sostenibilidad Ambiental del Recurso Hídrico	http://www.medioambiente.gov.do/cms/	Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la República Dominicana (2007) Indicadores de Sostenibilidad Ambiental del Recurso Hídrico en la República Dominicana 2000 - 2005. Oficina Sectorial de Planificación y Programación		
Bolivia	Sistema Nacional de Información para el Desarrollo Sostenible (SNIDS)	 http://www.planificacion.gov.bo	Ministerio de Planificación del Desarrollo.		

Fuente: elaboración propia.

Países Desarrollados

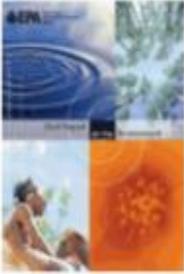
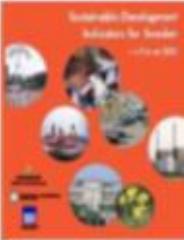
Cuadro A. I.1 (b). Vínculos y publicaciones de las principales iniciativas de indicadores ambientales. Países Desarrollados.

País	Sistema de Indicadores	IMG. Sist. de Indicadores	Actores relevantes	Publicaciones	IMG. Publicaciones
Canadá	<p>National Environmental Indicators Series Archive State of the Environment Infobase</p>	 http://www.ecoinfo.ec.gc.ca/env_ind/indicators_e.cfm	<p>Environment Canada - Knowledge Integration Strategies Division</p> <p>Statistics Canada</p> <p>Health Canada</p>	<p>Environment Signals, (2003). "Canada's National Environmental Indicator Series 2003". http://www.ec.gc.ca/soer-ree/English/Indicator_series/esignals.pdf</p> <p>Bond, W., D. O'Farrell, G. Ironside, B. Buckland, and R. Smith. (2005). "Environmental Indicators and State of the Environment Reporting: An Overview for Canada". Background paper to an Environmental Indicators and State of the Environment Reporting Strategy, 2004-2009, Environment Canada, Gatineau, Quebec http://www.ec.gc.ca/soer-ree/English/resource_net/work/bg_paper2_e.cfm.</p> <p>Canadian Environmental Sustainability Indicators 2005. Environment Canada, Statistics Canada, Health Canada, Government of Canada. http://www.statcan.ca/english/freepub/16-251-XIE/16-251-XIE2005000.pdf</p>	  
Australia y Nueva Zelandia	<p>Core Environmental Indicators for Reporting on the State of the Environment.</p>	<p>http://www.deh.gov.au/soe/publications/pubs/coreindicators.pdf http://www.deh.gov.au/about/environment-reports/index.html</p> 	<p>Australian and New Zealand Environment and Conservation Council – ANZECC-</p>	<p>Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, State of the Environment Reporting Task Force. (2000). "Core Environmental Indicators for Reporting on the State of the Environment". Environment Australia, Canberra.</p>	
España	<p>Indicadores Ambientales Información Estadística y Ambiental Ministerio de Medio Ambiente</p>	<p>http://www.mma.es/portal/secciones/info_estadistica_ambiental/estadisticas_info/</p> 	<p>Ministerio de Medio Ambiente</p> <p>Universidad de Alcalá</p>	<p>Ministerio del Medio Ambiente. (2005). "Perfil Ambiental de España 2005. Informe basado en indicadores". http://www.mma.es/portal/secciones/calidad_contaminacion/indicadores_ambientales/perfil_ambiental_2005/index.htm</p>	

País	Sistema de Indicadores	IMG. Sist. de Indicadores	Actores relevantes	Publicaciones	IMG. Publicaciones
				Ministerio del Medio Ambiente, (2004). "Perfil Ambiental de España 2004. Informe basado en indicadores". http://www.mma.es/portal/secciones/info_estadisticas_ambiental/estadisticas_info/perfil_ambiental/index.htm	
	Indicadores de Sostenibilidad Observatorio de la sostenibilidad en España	http://www.sostenibilidad-es.org/Observatorio+Sostenibilidad 		Observatorio de Sostenibilidad España, (2005). "Informe de Sostenibilidad en España 2005". Informe de Primavera. Universidad de Alcalá, Madrid. http://www.sostenibilidad-es.org/Observatorio+Sostenibilidad/esp/servicios/publicaciones/ise/	
Nueva Zelandia	Environmental Indicators (Indicadores de Desempeño Ambiental- EPI)	http://www.mfe.govt.nz/state/monitoring/epi/index.html 	The Ministry for the Environment	Taylor, Rowan, (1997) "The State of New Zealand Environment" The Ministry for the Environment, Wellington, New Zealand. Ministry for the Environment, (1998). "Environmental Performance Indicators: Summary of Proposed Indicators of Terrestrial and Freshwater Diversity". Ministry for the Environment, Wellington, New Zealand.	

				<p>Ministry for the Environment. (1998). "National Environmental Indicators: Building a Framework for a Core Set". Ministry for the Environment, Wellington, New Zealand. Ministry for the Environment, (1997). Environmental Performance Indicators: Proposal for Air, Fresh Water and land". Ministry for the Environment, Wellington, New Zealand. Ministry for the Environment, (1997) "Environmental Performance Indicators: Summary of Proposed Indicators of Terrestrial and Freshwater Diversity". Ministry for the Environment, Wellington, New Zealand.</p>	
				<p>Patterson, Murray, (2006), "Headline Indicators for tracking progress to sustainability in New Zealand". (Signposts for sustainability) Ministry for the Environment, Wellington, New Zealand.</p>	
				<p>The Ministry for the Environment (2006), "Gentle Footprints. Boots 'N' All". Wellington, New Zealand.</p>	
Reino Unido	<p>Headline Indicators of sustainable development Sustainable Development, UK.</p>		<p>Department of Environment, Food and Rural Affairs -DEFRA-, Sustainable Development Unit.</p>	<p>Sustainable Development Unit UK (2002). Achieving a better quality of life: review of progress towards sustainable development. Government annual report 2002. DEFRA - Sustainable Development Unit.</p>	
		<p>http://www.sustainable-development.gov.uk/index.asp</p>		<p>Sustainable Development Unit UK (2003). Achieving a better quality of life: review of progress towards sustainable development. Government annual report 2002. DEFRA - Sustainable Development Unit.</p>	

				<p>Sustainable Development Unit UK (2004). Quality of Life Counts. Indicators for a strategy for sustainable development for the United Kingdom. 2004 Update. Updating the baseline assessments made in 1999. DEFRA - Sustainable Development Unit.</p>	
				<p>Sustainable Development Unit UK (2003). Regional quality of Life Counts, 2003. Regional versions of the national headline Indicators of sustainable development. DEFRA - Sustainable Development Unit.</p>	
				<p>Sustainable Development Unit UK (2004). <i>Sustainable development indicators in your pocket 2006</i> Department of Environment, Food and Rural Affairs - Sustainable Development Unit, UK.</p>	
				<p>Sustainable Development Unit UK (2005). <i>Sustainable development indicators in your pocket 2006</i> Department of Environment, Food and Rural Affairs - Sustainable Development Unit, UK.</p>	
				<p>Sustainable Development Unit UK (2006). <i>Sustainable development indicators in your pocket 2006</i> Department of Environment, Food and Rural Affairs - Sustainable Development Unit, UK. http://www.sustainable-development.gov.uk/progress/index.htm</p>	
				<p>UK Government, (2005) "Securing the Future - UK Government sustainable development strategy". DEFRA, UK Government</p>	

Holanda		 http://www.mnp.nl/mno/index-en.html	<p>Netherlands Environmental Assessment Agency</p>		
Estados Unidos	<p>Sistema de Indicadores de Desarrollo Sostenible</p>	 http://www.sdi.gov/	<p>U. S. Interagency Working Group on Sustainable Development Indicators</p>	<p>U.S. Interagency Working Group on Sustainable Development Indicators, (2001) Sustainable Development in the United States: An Experimental Set of Indicators. Washington DC. http://www.sdi.gov/loBin22/pext.dll/Folder1/InfoBase7/1?fn=main-j.htm&f=templates&2.0</p>	
	<p>Sistema de Indicadores Ambientales</p>	 http://www.epa.gov/ebtpages/envienviromentalindicators.html	<p>EPA Environmental Protection Agency</p>	<p>United States Environmental Protection Agency, (2003) "Daft Report on the Environment (ROE)". Washington DC. United States Environmental Protection Agency, (2003) "Daft Report on the Environment Technical Document". Washington DC. http://cfpub2.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?id=56830</p>	
				<p>2005</p>	
Suecia	<p>Sustainable Development Indicators for Sweden</p>	 http://www.scb.se/templates/Amnesomrade_12460.asp	<p>Statistics Sweden The National Board of Housing, Building and Planning - Swedish Council on Sustainable Development</p>	<p>Statistics Sweden, (2002), "Sustainable Development Indicators for Sweden". http://www.scb.se/templates/Product_21323.asp</p>	
	<p>Environmental Indicators Swedish Environmental Objectives Council</p>	 http://www.naturvardsverket.se/bokhandeln/dse/620-1240-1	<p>Swedish Environmental Protection Agency (EPA) Environmental Objectives Council Swedish Environmental Advisory Council</p>	<p>Swedish Environmental Objectives Council, (2006), "Sweden's environmental objectives- buying into a better future" - deFacto 2006. A progress report from the Swedish Environmental Objectives Council. EPA. http://www.miljomal.nu/english/publications.php</p>	

		 <p>http://www.miljomal.nu/english/english.php</p>	<p>(EAC)</p>	<p>Swedish Environmental Objectives Council, (2005), "Sweden's environmental objectives- for the sake of our children" - deFacto 2005. A progress report from the Swedish Environmental Objectives Council. EPA. http://www.miljomal.nu/english/publications.php</p>	
				<p>Swedish Environmental Objectives Council, (2004), "Sweden's environmental objectives- are we getting there?" - deFacto 2004. A progress report from the Swedish Environmental Objectives Council. EPA. http://www.miljomal.nu/english/publications.php</p>	

Fuente: elaboración propia.

Anexo 1.1. Definiciones de Gestión Ambiental dadas por diversos autores

Cuadro A.1.1.1. Definiciones de Gestión Ambiental.

Autor/Año	Definición de Gestión Ambiental
(Espinoza, 2002)	Conjunto de acciones que realiza la sociedad en su conjunto con el fin de ordenar y manejar el medioambiente o sus componentes, con el fin de mantener y mejorar la calidad ambiental, de suministrar servicios ambientales, y de conservar, mantener y enriquecer los recursos naturales y los ecosistemas.
(Rodríguez Becerra <u>et al.</u> , 2002)	Conjunto de acciones emprendidas por la sociedad, o parte de ella, con el fin de proteger el medioambiente. Sus propósitos están dirigidos a modificar una situación actual a otra deseada, de conformidad a la percepción que sobre ella tengan los actores involucrados
(León <u>et al.</u> , 2004)	Conjunto de políticas, normas, actividades operativas y administrativas de planeamiento, financiamiento y control estrechamente vinculadas, que deben ser ejecutadas por el Estado y la sociedad para garantizar el desarrollo sustentable y una óptima calidad de vida
(Ricardo Cabrera <u>et al.</u> , 2015)	Conjunto de actividades, mecanismos, acciones e instrumentos, dirigidos a garantizar la administración y uso racional de los recursos naturales mediante la conservación, mejoramiento, rehabilitación y monitoreo del medioambiente y el control de la actividad del hombre en esta esfera
(Massolo, 2015)	Conjunto de acciones y estrategias mediante las cuales se organizan las actividades antrópicas que influyen sobre el ambiente con el fin de lograr una adecuada calidad de vida con la prevención o mitigación de los problemas ambientales.
(Liñan Solís, 2020)	Conjunto de actividades cuyo propósito principal es especificar el principios o componentes, llamados también elementos, en las organizaciones en asuntos de seguridad ambiental garantizando que el desarrollo de sus actividades y el cumplimiento de su misión estratégica.

Fuente: elaboración propia.

Anexo 1.2. Aplicaciones de los Índices Sintéticos en diversos sectores y áreas

Cuadro A.1.2.1. Principales áreas de aplicación de los índices sintéticos.

Áreas	Aplicación	Autor
Educación	Estimación del aprendizaje e inteligencia	(Martín <i>et al.</i> , 1994)
	Medición del grado de excelencia académica	(Rico, Leal, & Blasco, 2015)
	Calidad de las universidades	(Buesa Blanco, Heijs, J. & Kahwash, O., 2013)
	Responsabilidad social universitaria	(Viteri-Moya, 2011)
Hidrología	Identificar áreas de vulnerabilidad hidrogeológica	(Huaico-Malhue, Pérez-Morales & Daessle, 2017)
	Identificar la vulnerabilidad de Acuíferos	(Kardan Moghaddam, Jafari & Javadi, 2017)
	Identificar la vulnerabilidad en zonas costeras	(Kammoun, S. <i>et al.</i> , 2018)
Geografía o bienestar social	Medir el bienestar social	(Benítez, S. M., Romero, O. J. & Gil, E. C., 2015) (Roget, F. M., de Miguel Domínguez, J. C. & Fernández, P. M., 2005)
	Evaluación de las condiciones de habitabilidad	(Galindo, E. L., Flores Domínguez, A. D. & Zulaica, M. L., 2018)
	Análisis del riesgo de exclusión social en el medio rural	(Pizarro, J. E. & Guirao, P. M., 2019)
	Identificar sectores en la con grados diferenciales de vulnerabilidad ante eventos de exceso	(Mastrandrea, A. & Ángeles, G., 2020)

	hídrico	
	Medición de las diferencias de género	(Castañeda Abascal <u>et al.</u> , 2013)
	Índice de condiciones de vida	(Martín, A. C. & Barros, M. D., 2015)
	Índice de igualdad de género	(Rico, M. & Gómez-Limón, J. A., 2011)
	Medición de la calidad de vida	(Juárez Romero, O., Cañedo Villarreal, R. & Mendoza, M. D., 2017) (Pérez, CA, Burbano, C. & Londoño, H., 2017)
	Desarrollo humano sustentable	(Ibañez, N., Mujica, M. & Castillo, R., 2017)
	Desarrollo territorial	(López, M. F. & Mateos, B. P., 2015)
Economía	Analizar la convergencia económica	(Figueroa Arcila, V. F. & Herrero Prieto, L. C., 2003)
	Índice de bancarización	(García de Fernando, 2018)
	Evaluar el nivel de gestión económico-financiera (GEF) en las microempresas	(Portal Boza, Bernal Escoto & Feitó Madrigal, 2016)
	Índice de desarrollo sostenible	(Laxe, F. G., Palmero, F. M. & Francos, M. F., 2004)
	Índice de desempeño fiscal	(Ossa Giraldo, 2014)
	Convergencia económica	(Fernández Carvajal, Gómez, L. M. & Fernández, L. R., 2016)
	Índice de desarrollo económico	(Hernández Rojas, 2015)
Medioambiente	Medir calidad ambiental	(Yengle Ruíz, 2012) (Walden, C. S., Samaniego, M. L. & Gavilanes, J. M., 2017)

		(Celemin, J. P. & Velázquez, G. Á., 2015) (Escobar Jaramillo, 2006)
	Vulnerabilidad socio-ambiental	(Cardoso, M. M., 2017) (Cabral, V. N. & Zulaica, M. L., 2015)
	Sostenibilidad Ambiental	(Zulaica, M. L. & Tomadoni, M. M., 2015) (Meline Cantar, N. M. & Zulaica, M. L., 2017)
	Índice de riesgo de incendios forestales	(Rodríguez-Rodríguez, D. & Martínez-Vega, J., 2012)
Turismo	Evaluación de la sostenibilidad del turismo rural	(Pérez Gacia, 2009)
	Gestión sostenible de los destinos turísticos	(Palomeque, F. L. <u>et al.</u> , 2018)
	Medir creatividad en destinos turísticos	(García Suárez, 2019)
Salud	Localización y detección de casos nuevos de tuberculosis pulmonar.	(Águila Rodríguez <u>et al.</u> , 2018)
	Vigilancia y control de la tuberculosis.	(Armas Pérez, <u>et al.</u> , 2015)
	Necesidad de investigación y gestión ambiental basado en morbimortalidad.	(Gutiérrez Lesmes, Loba Rodríguez & Martínez Torres, 2018)
Agronomía	Formación del precio de la tierra para su uso agropecuario	(Lanfranco, B. A. & Sapriza, G., 2011) (Álvarez Scanniello, 2020)
Política	Índice de autonomía local subnacional	(Goineix, Freigedo, & Ruiz Díaz, 2020)

Innovación	Índice para describir el estado de innovación	(Seclen Luna. & Ponce Regalado, 2017) (Bravo Oliver, 2018)
Gestión y mejora de procesos	Gestión del conocimiento para potenciar el talento humano de las organizaciones productoras	(Medina León, Nogueira Rivera & Sánchez Macías, 2020)
	Índice integral de desempeño	(Medina León, Nogueira Rivera & Sánchez Macías, 2020)
	Índice de Gestión de la Tecnología y la Innovación (IGTI)	(Medina León, Nogueira Rivera & Sánchez Macías, 2020)

Fuente: elaboración propia.

Anexo 1.3. Pirámide de la Información Ambiental.

a) Datos ambientales.

Cuadro A.1.3.1. Lista de datos ambientales comúnmente disponibles.

Suelos / Biodiversidad	Aire	Agua
<ul style="list-style-type: none"> • Distribución del uso del suelo • Superficie nacional (excepto zonas urbanas) • Producción de madera • Áreas forestales • Suelo agrícola • Áreas protegidas • Especies en peligro globalmente • Número de especies en peligro • Programa de manejo de especies en peligro 	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de combustibles tradicionales • Producción comercial de energía • Producción de electricidad • Emisiones de dióxido de carbono <u>per capita</u> • Emisiones de dióxido de azufre <i>per capita</i> • Emisiones de gases de efecto invernadero • Producción de ciertos materiales y minerales • Contaminación del aire en ciudades 	<ul style="list-style-type: none"> • Población con acceso a agua potable para beber • Extracción de agua por sector • Extracción anual de agua • Recarga anual de agua subterránea • Fuentes anuales de agua renovable • Carga anual de los ríos • Producción de agua desalinizada • Concentraciones de nutrientes

Fuente: elaboración propia

b) Indicadores ambientales.

Numerosas organizaciones regionales, internacionales, agencias gubernamentales y grupos de científicos llevan a cabo iniciativas para desarrollar indicadores ambientales. El sistema de las Naciones Unidas cuenta con varias divisiones o agencias que han desarrollado grupos de indicadores relacionados con el medioambiente, diferenciados por objetivos. Algunas de las iniciativas, más importantes, a nivel internacional y regional.

Tabla A.1.3.1. Reseña de algunas iniciativas de indicadores ambientales.

Iniciativa / Agencia	No. de Indicadores	Ejemplos de Indicadores Propuestos
Internacional		
<u>A Better World for All 2000</u> /Fondo Monetario Internacional, OCDE, ONU y Banco Mundial	5	<ul style="list-style-type: none"> • Población con acceso a agua potable (%) • Áreas forestales (como porcentaje de la superficie nacional) • Biodiversidad: áreas protegidas (número de áreas) • Eficiencia energética: PIB por unidad de energía utilizada • Bióxido de carbono: emisiones <i>per capita</i>
ONU División de Estadística / Grupo de Trabajo Intergubernamental sobre el Avance de Estadísticas Ambientales	55	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de sustancias que reducen el ozono • Desertificación: superficie afectada • Concentración de coliformes fecales en cuerpos de agua dulce • Bosques • Zonas pesqueras
<u>Shaping the 21 Century Project</u> / Banco Mundial, OCDE y ONU	10	<ul style="list-style-type: none"> • Intensidad de uso de agua dulce • Uso del suelo: áreas forestales • Eficiencia energética: PIB por unidad de energía utilizada

Indicadores de Desarrollo Sustentable / Comisión de Desarrollo Sustentable de las Naciones Unidas	61	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de agua <i>per capita</i> • Acres de área reforestadas • Emisión de gases de efecto invernadero
Indicadores de Desempeño Ambiental / Banco Mundial	64	<ul style="list-style-type: none"> • Relación áreas naturales / áreas cultivadas • Concentraciones de metales pesados • Concentraciones ambientales de plomo
Compendio de Datos Ambientales 1999 / OCDE	23	<ul style="list-style-type: none"> • Áreas protegidas totales • Agua utilizada (porcentaje de disponibilidad anual bruto) • Emisiones de óxido de azufre
Regional		
Proyecto de Indicadores Ambientales y de Sustentabilidad para América Central (CIAT, PNUMA y Banco Mundial)	Varios indicadores e índices georeferenciados para los componentes del desarrollo sustentable (social, ambiental y económico) y temáticos, de acuerdo al marco de Presión-Estado-Impacto-Respuesta (P-E-I-R).	<ul style="list-style-type: none"> • Social: porcentaje de crecimiento poblacional (presión), esperanza de vida en años (estado), tasa de mortalidad materna (impacto) y porcentaje de inmunización infantil (respuesta). • Económico: PIB <i>per capita</i> (presión), porcentaje de fuerza laboral en la agricultura (estado), deuda externa <i>per capita</i> (impacto) e incentivos forestales (respuesta). • Ambiental: tasa de extinción de especies (presión), m^3/ha de volumen forestal (estado), porcentaje de composición forestal (impacto) y proyecciones de uso de suelo (respuesta).
Proyecto de Indicadores	Varios indicadores e índices	<ul style="list-style-type: none"> • Social: porcentaje de crecimiento poblacional (presión), esperanza de

Ambientales y de Sustentabilidad para América Central (CIAT, PNUMA y Banco Mundial)	georeferenciados para los componentes del desarrollo sustentable (social, ambiental y económico) y temáticos, de acuerdo al marco de Presión-Estado-Impacto-Respuesta (P-E-I-R).	<p>vida en años (estado), tasa de mortalidad materna (impacto) y porcentaje de inmunización infantil (respuesta).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Económico: PIB <i>per capita</i> (presión), porcentaje de fuerza laboral en la agricultura (estado), deuda externa <i>per capita</i> (impacto) e incentivos forestales (respuesta). • Ambiental: tasa de extinción de especies (presión), m^3/ha de volumen forestal (estado), porcentaje de composición forestal (impacto) y proyecciones de uso de suelo (respuesta).
Estado del Ambiente en la Unión Europea / Agencia Ambiental Europea	16	<ul style="list-style-type: none"> • Extracción de agua por sector • Tendencias en emisiones de dióxido de carbono a partir de combustibles fósiles • Ozono estratosférico y radiaciones ultravioletas sobre Europa
<u>Nordic Set of Environmental Indicators</u> / <u>Nordic Indicator Group</u>	37	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie irrigada • Cambios en el uso de combustibles fósiles • Impuestos • Mortalidad de peces

Fuente: elaboración propia

c) Índices ambientales.

Cuadro A.1.3.2. Índices Ambientales.

Índice	Fuente	Componentes / Indicadores del índice
Índice Piloto de Sustentabilidad Ambiental	Foro Económico Mundial, Centro de Derecho y Política Ambiental de Yale y Centro Internacional de Información de Ciencias de la Tierra (CIESIN)	64 variables de los siguientes componentes: <ul style="list-style-type: none"> • Sistemas Ambientales • Riesgos Ambientales • Impacto Humano • Capacidad social y empresarial • Administración global
<u>Living Planet Index</u>	Fondo Mundial para la Naturaleza, <u>New Economics Foundation</u> y <u>World Conservation Monitoring</u>	Indicadores de Ecosistemas Globales y Biodiversidad: <ul style="list-style-type: none"> • Bosques • Agua Dulce • Vida Marina
<u>Environmental Quality Index</u>	Grupo Consultivo en Indicadores de Desarrollo Sustentable	Índice de Presión Ambiental: <ul style="list-style-type: none"> • Huella Ecológica <i>per capita</i> • Riesgo Ambiental • Uso del Suelo
Proyecto Índice de Vulnerabilidad Ambiental	Comisión del Pacífico Sur en Geociencias Aplicadas (SOPAC)	Se enfoca en vulnerabilidad ambiental: <ul style="list-style-type: none"> • Ecosistemas • Biodiversidad • Poblaciones
Huella Ecológica	<u>World Wide Fund for Nature</u> (WWF)	<ul style="list-style-type: none"> • Suelo cultivado • Bosques • Consumo de Combustibles Fósiles • Degradación del Suelo

Fuente: elaboración propia.

d) Conocimiento ambiental para la toma de decisiones.

Cuadro A.1.3.3. Reportes ambientales más importantes.

Nombre del reporte	Frecuencia	Fuente
Perspectivas del Medioambiente Mundial	Bienal	PNUMA
<u>State of the World / Vital Signs</u>	Anual	<u>World Watch Institute</u>
Reporte de los Recursos Mundiales	Bienal	<u>World Resources Institute</u>
<u>Towards Sustainable Development – Environmental Indicators</u>	Bienal	OCDE
Otros reportes temáticos	Irregular	Banco Mundial, Agencias de Naciones Unidas, Organizaciones no Gubernamentales

Fuente: elaboración propia.

Anexo 2.1. Modelación del procedimiento mediante redes de Petri

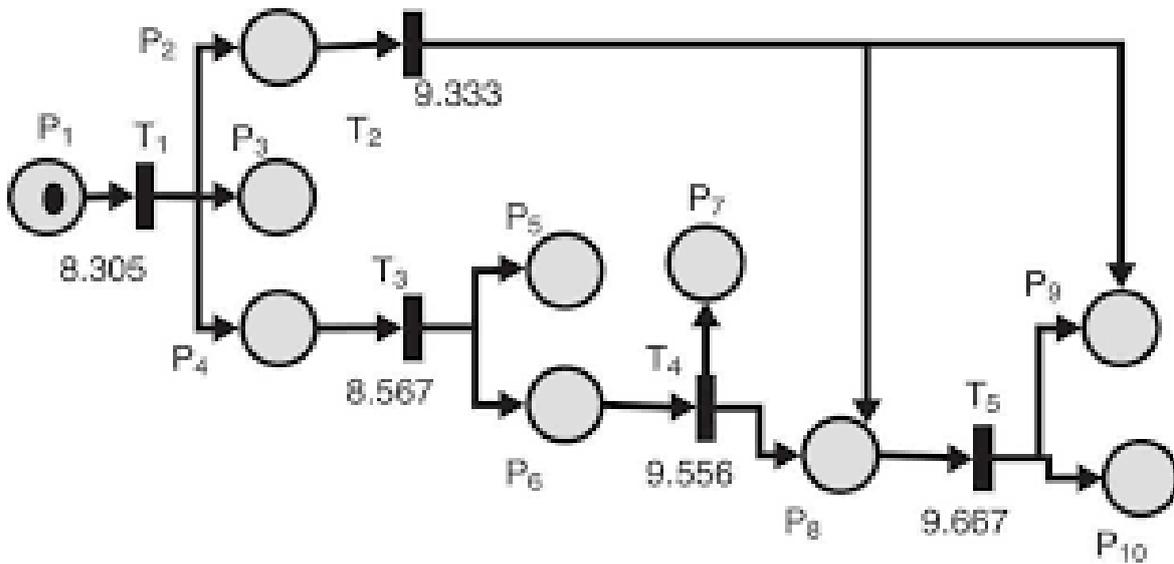


Figura A.2.1.1. Modelación del procedimiento mediante redes de Petri.

Fuente: elaboración propia (salida de WoPeD).

Anexo 2.2. Desarrollo de la técnica ladov

Cuadro A.2.2.1. Cuadro Lógico de ladov empleado.

	¿Considera Ud. que el procedimiento propuesto es factible de aplicar en las condiciones actuales de la gestión ambiental empresarial?								
¿Considera Ud. que el procedimiento propuesto resulta provechoso para lograr evaluar la gestión ambiental empresarial?	Sí			No sé			No		
	¿Si tuviera que evaluar la gestión ambiental de una empresa, utilizaría el procedimiento propuesto?								
	Sí	No sé	No	Sí	No sé	No	Sí	No sé	No
Me satisface mucho	1	2	6	2	2	6	6	6	6
Más satisfecho que insatisfecho	2	2	3	2	3	3	6	3	6
Me es indiferente	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Más insatisfecho que satisfecho	6	3	6	3	4	4	3	4	4
No me satisface	6	6	6	6	4	4	6	4	5
No sé qué decir	2	3	6	3	3	3	6	3	4

Fuente: elaboración propia.

Tabla A.2.2.1. Resumen ladov.

Escala	Resultado	Cantidad	Porcentaje
1	Clara satisfacción	11	78.57
2	Más satisfecho que insatisfecho	3	21.43
3	No definida		
4	Más insatisfecho que satisfecho		
5	Clara insatisfacción		
6	Contradictoria		

Fuente: elaboración propia.

$$ISG = 11*(+1) + 3*(+0.5) + 0*(0) + 0*(-0.5) + 0*(-1) = 0.8929$$

Anexo 3.1.a. Manifiesto interés de las empresas en la aplicación del procedimiento.

Subdelegación de Medio Ambiente

**MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE
DELEGACION PROVINCIAL MATANZAS**

A: *Humberto Iran Sardiñas Rodríguez,*
Coordinador para asuntos de la defensa, Gobierno Matanzas.
Presidente Consejo Interinstitucional del Macroprograma de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Matanzas.

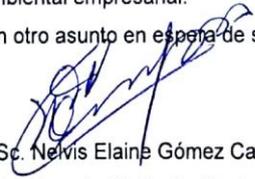
Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de asesora técnica del consejo Interinstitucional del Macroprograma de recursos naturales y medio ambiente, mecanismos de implementación del PNDES 2030, para poner en su conocimiento como presidente del consejo, que, en respuesta a las prioridades de trabajo, específicamente lo concerniente al enfrentamiento a la contaminación como amenaza directa a la diversidad biológica, y como hemos acordado previamente priorizar la atención a fuentes contaminantes a las bahías, por demás parte del corredor turístico de Matanzas; ya hoy contamos con gran satisfacción con el resultado "Instrumento metodológico para la gestión ambiental empresarial basado en índice sintético"; el cual lo estaremos proponiendo como herramienta a utilizar por las entidades, que soliciten el Aval ambiental, por cumplimiento de la legislación ambiental vigente, antes de someterse a las visitas de control, para el otorgamiento cumplimiento de la legislación ambiental vigente, ya que la consideramos, un efectivo mecanismo de autoevaluación de la gestión ambiental en las empresas, que les permitirá, acceder más fortalecidas a este incentivo ambiental.

Identificando en este caso la de mayor importancia y significación para la validación del mismo, la Empresa Comercializadora de Combustible, perteneciente al Minem.

Posteriormente, socializaremos este resultado en el sistema ambiental del Ministerio Citma, para proponer su generalización.

Por todo lo antes expuesto, solicitamos que se tome como acuerdo del consejo Interinstitucional de la provincia de matanzas, la utilización de este instrumento, de gestión ambiental empresarial.

Sin otro asunto en espera de su atención y colaboración se despide,


MSc. Nelvis Elaine Gómez Campos.
Subdelegada Medio Ambiente,
Delegación territorial del Citma, Matanzas.



Anexo 3.1.b. Apoyo del Citma para la aplicación del procedimiento en las empresas.



Subdelegación de Medio Ambiente

MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE DELEGACIÓN PROVINCIAL MATANZAS

AVAL

El panorama nacional está caracterizado por la ostensible reducción de importaciones; el incremento y diversificación de los actores de la política y la gestión ambiental; la descentralización; la política de desarrollo territorial; las nuevas regulaciones del trabajo por cuenta propia; así como la priorización del enfrentamiento a las ilegalidades y las indisciplinas con incidencia en los recursos naturales.

El escenario actual cubano ofrece grandes potencialidades para la presentación de una estrategia ambiental superior a la de ciclos anteriores.

Nos encontramos en el proceso de actualización de la nueva estrategia ambiental, para el ciclo 2021-2026, como documento que expresa la política ambiental cubana, donde la Dirección general de Medio Ambiente del Ministerio de Ciencia tecnología y medio Ambiente, está enfrascada en el desarrollo de índices sintéticos o integrados, para la medición de cada una de las Direcciones Estratégicas, que nos hemos trazado como país.

En el contexto de la provincia, *contar con una herramienta informática capaz, de evaluar la situación de la gestión ambiental empresarial, mediante indicadores, nos coloca como provincia en una posición privilegiada y abanderada, en la implementación de los objetivos de nuestro ministerio y país, lo cual sin lugar a dudas tiene posibilidad de generalización y por tanto asegurar un nivel superior en la conservación, protección y uso racional de los recursos naturales, en la calidad ambiental en los asentamientos humanos y en el enfrentamiento al cambio climático, con un enfoque ecosistémico, asegurando el derecho constitucional de los cubanos a vivir en un medio ambiente sano y equilibrado.*

El resultado que hoy tenemos a partir de una demanda como Delegación territorial y además de construcción mutua, por la constante interacción e intercambio de la autora, con los especialistas de la Subdelegación de Medio Ambiente y la Oficina de Regulación y Seguridad Ambiental de Matanzas, posee todo el respaldo institucional, por su pertinencia y contextualización.

Sirva este documento como un aval para el resultado: Instrumento metodológico para la gestión ambiental empresarial basado en Índice sintético, de la autora Liz Pérez Martínez.

MSc. Nelvis Elaine Gámez Campos.

Subdelegada Medio Ambiente,

Delegación territorial del Citma, Matanzas.



Anexo 3.2. Procedimiento para la jerarquización y/o reducción de los “Indicadores Ambientales Ciclo 2016-2020”.



**MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE
DELEGACIÓN TERRITORIAL
UNIDAD DE MEDIO AMBIENTE
MATANZAS**

Procedimiento para la jerarquización y/o reducción de los “Indicadores Ambientales Ciclo 2016-2020”. Estrategia Ambiental Territorial. Provincia de Matanzas.

A punto de partida de que han existidos criterios que el número de indicadores integrados en este ciclo son excesivos y por tanto difíciles de gestionar, así como por la importancia que tiene realizar una priorización o jerarquización de estos. **A continuación**, se describe los pasos a seguir para lograr su reducción y/o jerarquización.

Este trabajo será llevado a cabo por los expertos identificados por el equipo a cargo del trabajo, en cada una de las cuatro áreas claves en que se divide dicho documento

- Gestión de recursos naturales
- Calidad ambiental
- Cambio climático
- Instrumentos de política y gestión ambiental

Para proceder a jerarquizar los indicadores por parte de los expertos se debe ejecutar lo siguiente:

- No existen límites para la selección de cada indicador en cada una de las categorías en que el experto decida clasificar los indicadores. El experto solo le da la clasificación de 1, 2 o 3 a cada indicador.
- Si usted como experto a partir del conocimiento de la problemática y la información ambiental, estima que pueden existir otros indicadores que cumplen con los requisitos para ser tomados en consideración en esta área clave, por favor no dude en incluirlos y proceder a clasificarlos con consideración a las reglas explicadas con anterioridad.

Manejo de los suelos						
No	Nombre del indicador	Fuente de la serie estadística	Frecuencia	Usuario	Clasificación	Observaciones
1	Superficie en hectáreas con enfoque de Manejo Sostenible de Tierras por cuencas	Suelos Ministerio de la Agricultura (MINAG)	Anual	Citma		
2	Superficie en hectáreas beneficiadas con el Planes de Producción, por cuencas	Suelos MINAG	Anual	Citma		
3	% de ejecución de inversiones para la conservación de suelos a nivel territorial, por cuencas	Suelos MINAG	Anual	Citma		
4	Superficie en hectáreas beneficiadas con aplicación de materia orgánica, por cuencas	Suelos MINAG	Anual	Citma		
5	Superficie en hectáreas de suelos monitoreadas por año, por cuencas	Suelos MINAG	Anual	Citma		
6	Número de fincas declaradas bajo Manejo Sostenible de Tierras, por cuencas	Suelos MINAG	Anual	Citma		
7	Número de polígonos de Suelo por cuencas	Suelos MINAG	Anual	Citma		
8	Número de programas de Conservación de suelos implementados en las empresas productivas, por cuencas	Suelos MINAG	Anual	Citma		
9	Número de tecnologías implementadas para la protección	Suelos MINAG	Anual	Citma		

	de los suelos por entidades agropecuarias.					
Bosque						
1.	% de índice de Boscosidad por cuenca.	Forestal MINAG	Anual	Citma Gobierno		
2.	%, de supervivencia por cuenca	Forestal MINAG	Anual	Citma Gobierno		
3.	% de las fajas Hidrorregulado reforestadas por cuencas	Forestal MINAG	Anual	Citma Gobierno		
4.	% de especies nativas en los viveros para la reforestación	Forestal MINAG	Anual	Citma		
5.	Cantidad de Incendios Forestales por cuenca. Hectáreas de plantaciones afectadas y de bosques naturales	Forestal MINAG	Anual	Citma Gobierno		
6.	% de implementación del sistema integrado de alerta temprana	Forestal MINAG	Anual	Citma Gobierno		
7.	% de captación de carbono	Forestal MINAG	Anual	Citma		
8.	Producción de posturas (Miles Posturas). Frutales y de otras especies seleccionadas	Forestal MINAG	Anual	Citma Gobierno		
9.	Número de medidas utilizadas para restauración de la diversidad en el bosque	Forestal MINAG	Anual	Citma		
Uso racional del recurso agua						
10.	% de cobertura de metros contadores en sectores: estatal residencial por cuencas	Dirección Provincial de Recursos Hidráulicos (DPRH)	Anual	Citma Gobierno		

11.	% de cumplimiento del balance de agua provincial por cuenca	DPRH	Anual	Citma Gobierno		
12.	% de medidas ejecutadas del programa por cuenca. Cantidad de salideros eliminados	DPRH	Anual	Citma Gobierno		
13.	Km de redes rehabilitados por cuenca	DPRH	Anual	Citma Gobierno		
14.	No de nuevas tecnologías para el ahorro del agua implementadas en los grandes consumidores de agua por cuencas	DPRH	Anual	Citma Gobierno		
15.	% de ejecución de inversiones previstas por cuencas	DPRH	Anual	Citma Gobierno		
16.	% del programa hidráulico cumplido por cuenca	DPRH	Anual	Citma Gobierno		
17.	Miles de pesos ejecutados por cuenca	DPRH	Anual	Citma Gobierno		
18.	% de control de efectividad por cuenca	DPRH	Anual	Citma Gobierno		
19.	Número de inversiones efectivas por cuenca	DPRH	Anual	Citma Gobierno		
20.	Número de inversiones inefectivas por cuenca	DPRH	Anual	Citma Gobierno		
21.	% de la calidad de agua en las fuentes de abasto por cuenca	DPRH	Anual	Citma Gobierno		
22.	Número de tratamientos aplicados a los sistemas de abasto por cuenca	DPRH	Anual	Citma Gobierno		
23.	%, o m ³ de mejora en la eficiencia	DPRH	Anual	Citma Gobierno		

	expresado en la productividad y la dotación de consumo por cuenca					
24.	Índice simplificado de gestión en cuencas hidrográficas por cuenca	DPRH	Anual	Citma		
25.	Número cuencas diagnosticadas en peligro de sequía	DPRH	Anual	Citma Gobierno		
26.	Número de boletines de alerta a la sequía	DPRH	Semestral	Citma Gobierno		
Diversidad biológica						
27.	% de universo forestal de la provincia que cuenta con proyectos de ordenación forestal por cuenca.	MINAG Flora y Fauna Empresas Forestales	Anual	Citma		
28.	% de los sistemas de tratamientos de residuales en estos ecosistemas priorizados por cuenca Buen estado. Regular Mal estado	MINAG Flora y Fauna Empresas Forestales	Anual	Citma		
29.	Número de medidas reflejadas en los instrumentos que regulan el acceso y manejo a la diversidad biológica por cuenca	Citma	Anual	Citma Gobierno		
30.	Número de licencias de acceso y uso, y procesos de microlocalización es que involucren el uso de OVM, agentes biológicos y especies	Citma	Anual	Citma Gobierno		

	exóticas invasoras por cuenca					
31.	Número de procesos de microlocalizaciones que involucren el uso de OVM, agentes biológicos y especies exóticas invasoras por cuenca	Citma	Anual	Citma Gobierno		
32.	Cantidad de contravenciones y otras medidas impuestas para Proteger las Especies de Especial Significado según la Resolución 160/2009 y mediante los instrumentos regulatorios vigentes De ellas: entidades estatales y TCP	Citma Guadabosques del Ministerio del Interior	Trimestral	Citma Gobierno		
33.	% de efectividad de manejo del sistema provincial de áreas protegidas.	MINAG Flora y Fauna Empresas Forestales	Anual	Citma		
34.	% de implementación de las acciones estratégicas que garanticen la gestión integrada de recurso suelo, agua y bosque.	MINAG Flora y Fauna Empresas Forestales	Anual	Citma		
35.	% de presiones de origen natural y antrópicas sobre la biodiversidad, identificadas en la estrategia ambiental.	Citma	Anual	Citma		
36.	% de ejecución de las acciones de la estrategia relativas al	MINAG Flora y Fauna Empresas	Anual	Citma		

	manejo de especies exóticas invasoras.	Forestales				
37.	Número de planes de manejo de Claria, marabú, melaleuca, casuarina y leucaena en áreas priorizadas	MINAG Flora y Fauna Empresas Forestales	Anual	Citma		
38.	% de planes de manejo de áreas protegidas y planes de reforestación provincial donde se promueven el uso de especies nativas.	Citma Flora y Fauna Empresas Forestales	Anual	Citma		
39.	% de ejecución de acciones identificadas en la estrategia de gestión y manejo del fuego.	MINAG Flora y Fauna Empresas Forestales	Anual	Citma		
40.	Número de estudios realizados de identificación de bienes y servicios ecosistémicos en ecosistemas priorizados	Flora y Fauna Empresas Forestales Citma Universidad de Matanzas	Anual	Citma Instituto de Planificación Física (IPF)		
41.	Número de estudios realizados de valoración económica de bienes y servicios ecosistémicos en ecosistemas priorizados	Flora y Fauna Empresas Forestales Citma Universidad de Matanzas	Anual	Citma IPF		
42.	Número de programas de restauración con uso de flora nativa en ecosistemas priorizados	Flora y Fauna Empresas Forestales Citma Empresa Perforadora y Extractora de Petroleo del Centro	Anual	Citma IPF		

Cuadro A.3.1.1. Encuesta a expertos en gestión ambiental.

Fuente: elaboración propia.

Anexo 3.3. Procedimiento completo para el cálculo del ISGAE con RStudio

La realidad fenoménica se manifiesta como un conjunto de interacciones propias de las partes que lo componen ya sean estos observables o de forma latente. En general, los fenómenos económicos pueden ser descritos por la interacción de un conjunto de variables, en este caso se dice que, esta descrito por una variable compleja, es decir que su descripción está en función de muchas variables, y estas a su vez por una batería de indicadores simples. Al momento de proponer la construcción del índice sintético, debe tenerse claro que variable compleja (fenómeno a describir) es la que pretende medir. La batería de indicadores debe responder a un marco teórico, asociado a dicha variable compleja. Los indicadores deben ser lo más variados posibles, en función de la información disponible, para reflejar todas las aristas del fenómeno a describir. Es importante no confundir la definición de variable compleja.

Componentes principales y análisis factorial

Dentro de las técnicas multivariantes, la reducción de la dimensión de los datos en el orden de las variables, resulta ser especialmente útil ya que permite agruparlas de manera robusta, y al mismo tiempo garantiza que los componentes (agrupaciones encontradas, denominadas también variables latentes) sean incorrelacionados, es decir por un lado las variables originales representadas en cada componente guardan la máxima correlación entre ellas, pero las variables latentes resultan ser excluyentes entre sí.

Cálculo de $V(X)$ y $R(X)$

A efectos prácticos, sólo se requiere que todas las variables sean métricas (variables numéricas), pero para los propósitos de elaboración de indicadores, se verificará también el grado de multicolinealidad de la batería de indicadores (variables dentro del data frame), se denotará en todo momento como X , o matriz de información, y X^- el vector de medias () ecuación A.1 y A.2).

Se puede trabajar sobre la matriz de varianza-covarianza de X :

$$V(x) = \frac{(X - \bar{X})^t * (X - \bar{X})}{n-1} \quad (A.1)$$

o sobre la matriz de correlación de X :

$$R(x) = \frac{Z_X^t * Z_X}{n-1} \quad (A.2)$$

Donde Z_X es la matriz de datos estandarizada (distribución normal, ecuación A.3).

$$Z_{Xj} = \frac{x_j - x_j}{\sigma_x} \quad (A.3)$$

Matriz de Información: X

```

library(readr)
library(kableExtra)
url_link<-"http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/agrane/libro/fi
cheros_datos/capitulo_7/datos_prob_7_3.txt"
mat_X<-read_table2(url_link,col_names = FALSE)

mat_X %>% head() %>%
  kable(caption = "Matriz de información:" ,align = "c",digits = 6) %>%
  kable_material(html_font = "sans-serif")

```

13	24	380	0442	4	32	03	05
445	44	400	4583	5	24	55	04
80	43	080	432	8	50	334	40
02	48	310	0	2	50	50	04
454	40	440	022	0	21	80	02
30	44	010	3803	45	04	344	45
X4	X5	X3	X4	X2	X0	X1	X8

Figura A.3.2.1. Matriz de Información.

Fuente: elaboración propia.

Cálculo de $V(X)$

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
-49.67	-0.67	303.89	1463.5	2.94	-60.17	196.72	0.71
44.33	4.33	43.89	-1484.5	-3.06	-97.17	-55.28	0.01
15.33	6.33	3.89	-2433.5	-4.06	-128.17	-124.28	-0.39
10.33	1.33	313.89	-2004.5	-1.06	-134.17	186.72	1.11
32.33	-0.67	-266.11	-1146.5	-7.06	-103.17	-122.28	-0.39
-6.67	9.33	23.89	3675.5	-5.06	-119.17	-51.28	-0.29

Figura A.3.2.2. Matriz de variables centradas.

Fuente: elaboración propia.

Cálculo manual

```

library(dplyr)
library(kableExtra)
centrado<-function(x) {
  x-mean(x)
}

```

```
Xcentrada<-apply(X = mat_X,MARGIN = 2,centrado)
Xcentrada %>% head() %>%
  kable(caption = "Matriz de Variables centradas:",
        align = "c",
        digits = 2) %>%
  kable_material(html_font = "sans-serif")
```

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
X1	716.12	45.06	-2689.61	-16082.06	-121.63	-1019.06	-1844.37	-5.15
X2	45.06	46.94	-144.31	2756.71	-24.63	-938.41	-205.25	-0.42
X3	-2689.61	-144.31	36389.87	123889.71	740.82	838.33	17499.38	73.48
X4	-16082.06	2756.71	123889.71	5736372.383078.97	6672.44	140343.50	412.79	
X5	-121.63	-24.63	740.82	3078.97	51.47	405.58	565.22	1.59
X6	-1019.06	-938.41	838.33	6672.44	405.58	26579.56	3149.77	-2.96
X7	-1844.37	-205.25	17499.38	140343.50	565.22	3149.77	16879.39	64.51
X8	-5.15	-0.42	73.48	412.79	1.59	-2.96	64.51	0.28

Figura A.3.2.3. Cálculo de $V(X)$ de forma manual.

Fuente: elaboración propia.

```
n_obs<-nrow(mat_X)
mat_V<-t(Xcentrada)*%Xcentrada/(n_obs-1)
mat_V %>% kable(caption = "Cálculo de V(X) forma manual:" ,
               align = "c",
               digits = 2) %>%
  kable_material(html_font = "sans-serif") %>%
  kable_styling(bootstrap_options = c("striped", "hover"))
```

Cálculo con R base

```
library(dplyr)
library(kableExtra)
cov(mat_X) %>%
  kable(caption="Cálculo de V(X) a través de R base",
        align = "c",
        digits = 2) %>%
  kable_material(html_font = "sans-serif") %>%
  kable_styling(bootstrap_options = c("striped", "hover"))
```

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
X1	716.12	45.06	-2689.61	-16082.06	-121.63	-1019.06	-1844.37	-5.15
X2	45.06	46.94	-144.31	2756.71	-24.63	-938.41	-205.25	-0.42
X3	-2689.61	-144.31	36389.87	123889.71	740.82	838.33	17499.38	73.48
X4	-16082.06	2756.71	123889.71	5736372.383078.97	6672.44	140343.50	412.79	
X5	-121.63	-24.63	740.82	3078.97	51.47	405.58	565.22	1.59
X6	-1019.06	-938.41	838.33	6672.44	405.58	26579.56	3149.77	-2.96
X7	-1844.37	-205.25	17499.38	140343.50	565.22	3149.77	16879.39	64.51
X8	-5.15	-0.42	73.48	412.79	1.59	-2.96	64.51	0.28

Figura A.3.2.4. Cálculo de $V(X)$. con R

Fuente: salida de RStudio.

Cálculo de $R(X)$

Cálculo manual

```
Zx<-scale(x = mat_X,center =TRUE)
Zx %>% head() %>%
  kable(caption = "Matriz de Variables Estandarizadas:",
        align = "c",
        digits = 2) %>%
  kable_material(html_font = "sans-serif")
```

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
-1.86	-0.10	1.59	0.61	0.41	-0.37	1.51	1.34
1.66	0.63	0.23	-0.62	-0.43	-0.60	-0.43	0.02
0.57	0.92	0.02	-1.02	-0.57	-0.79	-0.96	-0.73
0.39	0.19	1.65	-0.84	-0.15	-0.82	1.44	2.09
1.21	-0.10	-1.39	-0.48	-0.98	-0.63	-0.94	-0.73
-0.25	1.36	0.13	1.53	-0.70	-0.73	-0.39	-0.54

Figura A.3.2.5. Matriz de variables estandarizadas.

Fuente: elaboración propia.

```
n_obs<-nrow(mat_X)
mat_R<-t(Zx)%*%Zx/(n_obs-1)
mat_R %>% kable(caption = "Cálculo de R(X) forma manual:" ,
               align = "c",
               digits = 2) %>%
```

```
kable_material(html_font = "sans-serif") %>%
kable_styling(bootstrap_options = c("striped", "hover"))
```

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
X1	1.00	0.25	-0.53	-0.25	-0.63	-0.23	-0.53	-0.36
X2	0.25	1.00	-0.11	0.17	-0.50	-0.84	-0.23	-0.12
X3	-0.53	-0.11	1.00	0.27	0.54	0.03	0.71	0.73
X4	-0.25	0.17	0.27	1.00	0.18	0.02	0.45	0.32
X5	-0.63	-0.50	0.54	0.18	1.00	0.35	0.61	0.42
X6	-0.23	-0.84	0.03	0.02	0.35	1.00	0.15	-0.03
X7	-0.53	-0.23	0.71	0.45	0.61	0.15	1.00	0.93
X8	-0.36	-0.12	0.73	0.32	0.42	-0.03	0.93	1.00

Figura A.3.2.6. Cálculo de R(X) de forma manual.

Fuente: elaboración propia.

Cálculo con R base

```
library(dplyr)
library(kableExtra)
cor(mat_X) %>%
kable(caption="Cálculo de R(X) a través de R base",
align = "c",
digits = 2) %>%
kable_material(html_font = "sans-serif") %>%
kable_styling(bootstrap_options = c("striped", "hover"))
```

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
X1	1.00	0.25	-0.53	-0.25	-0.63	-0.23	-0.53	-0.36
X2	0.25	1.00	-0.11	0.17	-0.50	-0.84	-0.23	-0.12
X3	-0.53	-0.11	1.00	0.27	0.54	0.03	0.71	0.73
X4	-0.25	0.17	0.27	1.00	0.18	0.02	0.45	0.32
X5	-0.63	-0.50	0.54	0.18	1.00	0.35	0.61	0.42
X6	-0.23	-0.84	0.03	0.02	0.35	1.00	0.15	-0.03
X7	-0.53	-0.23	0.71	0.45	0.61	0.15	1.00	0.93
X8	-0.36	-0.12	0.73	0.32	0.42	-0.03	0.93	1.00

Figura A.3.2.7. Cálculo de R(X) con R.

Fuente: salida de RStudio.

Versiones gráficas de $R(X)$

Pueden ser especialmente útiles en la presentación de reportes, además de proveer una vista rápida de algunas características propias de la correlación entre las variables.

Paquete *PerformanceAnalytics*

```
library(PerformanceAnalytics)
chart.Correlation(as.matrix(mat_X), histogram = TRUE, pch=12)
```

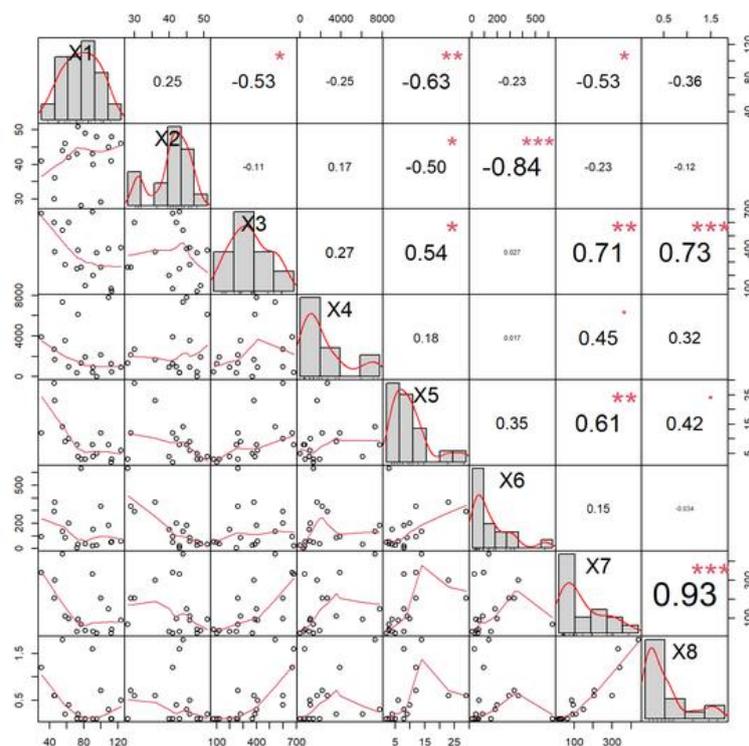


Figura A.3.2.8. Histograma de $R(X)$ con R .

Fuente: salida de RStudio.

Paquete *corrplot*

```
library(corrplot)
library(grDevices)
library(Hmisc)
Mat_R<-rcorr(as.matrix(mat_X))
corrplot(Mat_R$r,
         p.mat = Mat_R$r,
         type="upper",
         tl.col="black",
         tl.srt = 20,
         pch.col = "blue",
         insig = "p-value",
         sig.level = -1,
         col = terrain.colors(100))
```



Figura A.3.2.9. Correlaciones de R(X) con R.

Fuente: salida de RStudio.

Extracción de los Componentes

La Primera componente Principal, se expresa como la combinación lineal de las variables originales (ecuación A.4):

$$C_{1j} = a_{11} \cdot x_{1j} + a_{12} \cdot x_{2j} + a_{13} \cdot x_{3j} + \dots + a_{1n} \cdot x_{nj} \quad (A.4)$$

Matricialmente se tiene (ecuación A.5):

$$C_1 = X \cdot a \quad (A.5)$$

Sí la matriz de información se encuentra normalizada, entonces (ecuación A.6):

$$C_1 = Z \cdot a \quad (A.6)$$

Entonces la varianza de C_1 se puede escribir como (ecuación A.7):

$$V(C_1) = \frac{\sum_j^n c_{1j}^2}{n-1} \quad (A.7)$$

Matricialmente se tiene (ecuación A.8):

$$V(C_1) = \frac{C_1^t \cdot C_1}{n-1} = \frac{(Z \cdot a)^t \cdot (Z \cdot a)}{n-1} = \frac{a^t \cdot Z^t \cdot Z \cdot a}{n-1} = a^t \cdot R(X) \cdot a \quad (A.8)$$

Deben elegirse los pesos a , de manera tal que $V(C_1)$ sea máxima, y a debe ser de longitud unitaria, es decir de norma 1. Por lo tanto, el problema se reduce a la (ecuación A.9):

$$\begin{aligned} &Max \ a^t \cdot R(X) \cdot a \\ &s. \ a^t \cdot a = 1 \end{aligned} \quad (A.9)$$

Se aplica la técnica de los multiplicadores de Lagrange (ecuación A.10):

$$L = a^t \cdot R(X) \cdot a - \lambda(a^t \cdot a - 1) \quad (A.10)$$

Se aplica la condición de primer (A.11) orden:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial a} &= 2R(x)a - 2\lambda a = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= a^t \cdot a - 1 = 1 \end{aligned} \quad (A.11)$$

Lo que implica (ecuación A.12):

$$[R(x) - \lambda I]a = 0$$

$$a^t a = 1 \quad (\text{A.12})$$

Es decir, el máximo autovalor de $R(X)$ y el respectivo autovector (valores de a), queda resuelto el problema de maximización. De la misma manera se encuentran el resto de componentes. En general para encontrar la totalidad de los componentes principales, se deberán calcular los autovalores de $R(X)$ y los autovalores para cada uno de ellos.

Extracción

A partir de los datos de entrenamiento, se encontrarán *todos* los componentes de la batería de indicadores (`dataframe`):

```
library(kableExtra)
library(dplyr)
library(Hmisc)
Rx<-mat_X %>% as.matrix() %>% rcorr()
Rx$r %>% kable(caption="Matriz R(X)",
  align = "c",
  digits = 2) %>%
  kable_material(html_font = "sans-serif") %>%
  kable_styling(bootstrap_options = c("striped", "hover"))
```

Tabla A.3.2.1. Matriz de datos.

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
X1	1.00	0.25	-0.53	-0.25	-0.63	-0.23	-0.53	-0.36
X2	0.25	1.00	-0.11	0.17	-0.50	-0.84	-0.23	-0.12
X3	-0.53	-0.11	1.00	0.27	0.54	0.03	0.71	0.73
X4	-0.25	0.17	0.27	1.00	0.18	0.02	0.45	0.32
X5	-0.63	-0.50	0.54	0.18	1.00	0.35	0.61	0.42
X6	-0.23	-0.84	0.03	0.02	0.35	1.00	0.15	-0.03
X7	-0.53	-0.23	0.71	0.45	0.61	0.15	1.00	0.93
X8	-0.36	-0.12	0.73	0.32	0.42	-0.03	0.93	1.00

Fuente: salida de RStudio.

```
Rx$P %>% kable(caption="p-values de R(X)",
  align = "c",
  digits = 2) %>%
  kable_classic_2(html_font = "sans-serif") %>%
  kable_styling(bootstrap_options = c("striped", "hover"))
```

Tabla A.3.2.2. *p-values* de R(X)

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
X1	NA	0.33	0.02	0.32	0.00	0.35	0.02	0.14
X2	0.33	NA	0.66	0.51	0.03	0.00	0.36	0.65
X3	0.02	0.66	NA	0.28	0.02	0.92	0.00	0.00
X4	0.32	0.51	0.28	NA	0.48	0.95	0.06	0.19
X5	0.00	0.03	0.02	0.48	NA	0.16	0.01	0.08

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
X6	0.35	0.00	0.92	0.95	0.16	NA	0.56	0.89
X7	0.02	0.36	0.00	0.06	0.01	0.56	NA	0.00
X8	0.14	0.65	0.00	0.19	0.08	0.89	0.00	NA

Fuente: salida de RStudio.

Descomposición de autovalores y autovectores

```
library(stargazer)
descomposicion<-eigen(Rx$r)
t(descomposicion$values) %>% kable(caption="Autovalores de R(X)",
  align = "c",
  digits = 2) %>%
  kable_classic_2(html_font = "sans-serif") %>%
  kable_styling(bootstrap_options = c("striped", "hover"))
```

Tabla A.3.2.3. Autovalores de R(X)

Autovalores de R(X)							
3.75	1.93	0.84	0.72	0.34	0.31	0.1	0.01

Fuente: salida de RStudio.

```
descomposicion$vectors %>% kable(caption="Autovectores de R(X)",
  align = "c",
  digits = 2) %>%
  kable_classic_2(html_font = "sans-serif") %>%
  kable_styling(bootstrap_options = c("striped", "hover"))
```

Tabla A.3.2.4. Autovectores de R(X)

Autovectores de R(X)							
-0.37	-0.05	-0.03	0.71	-0.42	0.41	0.12	0.06
-0.22	-0.61	0.05	-0.24	0.05	0.01	0.70	-0.15
0.41	-0.20	-0.27	-0.02	0.36	0.75	-0.05	0.11
0.22	-0.29	0.88	0.04	-0.08	0.16	-0.23	-0.06
0.41	0.18	-0.09	-0.35	-0.75	0.18	0.19	-0.18
0.18	0.61	0.30	0.21	0.32	0.09	0.57	-0.18
0.47	-0.17	-0.01	0.28	-0.09	-0.34	0.26	0.69
0.41	-0.27	-0.21	0.45	0.04	-0.29	-0.07	-0.65

Fuente: salida de RStudio.

Cálculo con R

```
library(dplyr)
library(factoextra)
library(kableExtra)
library(stargazer)
library(ggplot2)
options(scipen = 99999)
PC<-princomp(x = mat_X, cor = TRUE, fix_sign = FALSE)
factoextra::get_eig(PC) %>% kable(caption="Resumen de PCA",
  align = "c",
  digits = 2) %>%
  kable_material(html_font = "sans-serif") %>%
```

```
kable_styling(bootstrap_options = c("hover"))
```

Tabla A.3.2.5. Resumen PCA

	eigenvalue	variance.percent	cumulative.variance.percent
Dim.1	3.75	46.92	46.92
Dim.2	1.93	24.11	71.03
Dim.3	0.84	10.45	81.48
Dim.4	0.72	9.04	90.52
Dim.5	0.34	4.26	94.77
Dim.6	0.31	3.81	98.59
Dim.7	0.10	1.24	99.83
Dim.8	0.01	0.17	100.00

Fuente: salida de RStudio.

```
fviz_eig(PC,
  choice = "eigenvalue",
  barcolor = "red",
  barfill = "red",
  addlabels = TRUE,
) + labs(title = "Gráfico de Sedimentación", subtitle = "Usando pr
incomp, con Autovalores") +
  xlab(label = "Componentes") +
  ylab(label = "Autovalores") + geom_hline(yintercept = 1)
```

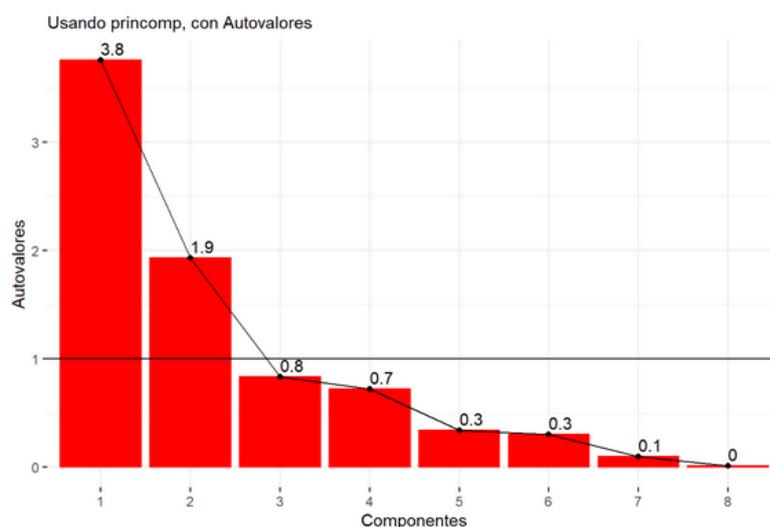


Figura A.3.2.10. Gráfico de Sedimentación con autovalores.

Fuente: salida de RStudio.

```
fviz_eig(PC,
  choice = "variance",
  barcolor = "green",
  barfill = "green",
  addlabels = TRUE,
) + labs(title = "Gráfico de Sedimentación",
  subtitle = "Usando princomp, con %Varianza Explicada") +
```

```
xlab(label = "Componentes") +
ylab(label = "%Varianza")
```

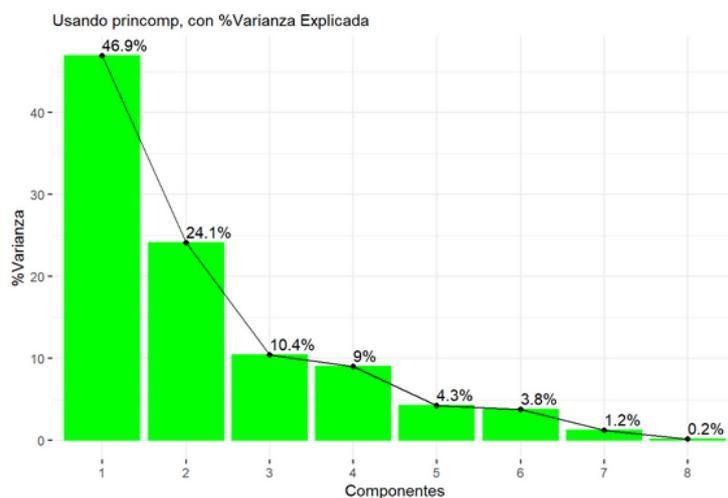


Figura A.3.2.11. Gráfico de Sedimentación con varianza.

Fuente: salida de RStudio.

Correlación de los componentes con las variables (ecuación A.13):

$$r_{ij} = a_j * \sqrt{\lambda_j} \quad (\text{A.13})$$

```
library(dplyr)
library(kableExtra)
raiz_lambda<-as.matrix(sqrt(descomposicion$values))
autovectores<-descomposicion$vectors
corr_componentes_coordenadas<-vector(mode = "list")
for(j in 1:8){raiz_lambda[j]*autovectores[,j]->corr_componentes_coordenadas[[j]]}
corr_componentes_coordenadas %>% bind_cols()->corr_componentes_coordenadas
names(corr_componentes_coordenadas)<-paste0("Comp",1:8)
corr_componentes_coordenadas %>% as.data.frame() %>%
  kable(caption="Correlación de X con las componentes",
        align = "c",
        digits = 2) %>%
  kable_material(html_font = "sans-serif") %>%
  kable_styling(bootstrap_options = c("striped", "hover"))
```

Tabla A.3.2.6. Correlación de X con las componentes

Comp1	Comp2	Comp3	Comp4	Comp5	Comp6	Comp7	Comp8
-0.72	-0.06	-0.03	0.60	-0.25	0.22	0.04	0.01
-0.43	-0.85	0.04	-0.20	0.03	0.01	0.22	-0.02
0.80	-0.28	-0.25	-0.02	0.21	0.42	-0.02	0.01
0.42	-0.40	0.81	0.03	-0.05	0.09	-0.07	-0.01
0.80	0.25	-0.08	-0.29	-0.44	0.10	0.06	-0.02
0.34	0.84	0.27	0.18	0.19	0.05	0.18	-0.02
0.91	-0.23	-0.01	0.24	-0.05	-0.19	0.08	0.08
0.80	-0.38	-0.20	0.38	0.02	-0.16	-0.02	-0.08

Fuente: salida de RStudio.

Con Facto Extra

```
library(dplyr)
library(factoextra)
library(kableExtra)
variables_pca<-get_pca_var(PC)
variables_pca$coord%>%
  kable(caption="Correlación de X con las componentes, usando factoextra",
        align = "c",
        digits = 2) %>%
  kable_material(html_font = "sans-serif") %>%
  kable_styling(bootstrap_options = c("striped", "hover"))
```

Tabla A.3.2.7. Correlación de X con las componentes, con *factoextra*.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5	Dim.6	Dim.7	Dim.8
X1	-0.72	-0.06	-0.03	0.60	0.25	0.22	0.04	0.01
X2	-0.43	-0.85	0.04	-0.20	-0.03	0.01	0.22	-0.02
X3	0.80	-0.28	-0.25	-0.02	-0.21	0.42	-0.02	0.01
X4	0.42	-0.40	0.81	0.03	0.05	0.09	-0.07	-0.01
X5	0.80	0.25	-0.08	-0.29	0.44	0.10	0.06	-0.02
X6	0.34	0.84	0.27	0.18	-0.19	0.05	0.18	-0.02
X7	0.91	-0.23	-0.01	0.24	0.05	-0.19	0.08	0.08
X8	0.80	-0.38	-0.20	0.38	-0.02	-0.16	-0.02	-0.08

Fuente: salida de RStudio.

Representación Gráfica de las correlaciones en los ejes de los componentes

```
fviz_pca_var(PC, repel = TRUE, axes = c(1,2))
```

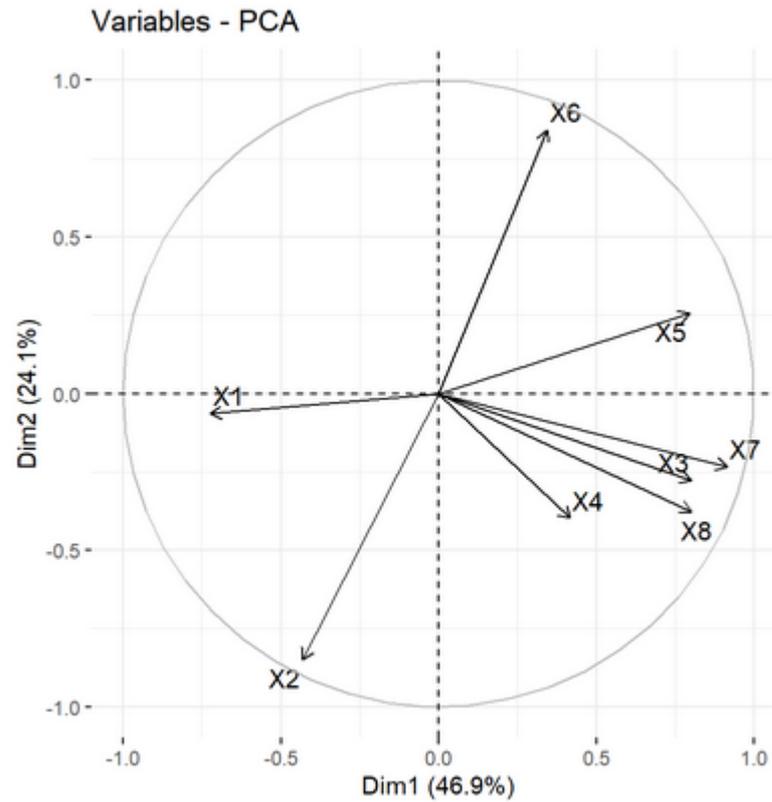


Figura A.3.2.12. Correlaciones en los ejes de los componentes (Dimensiones 1 y 2).

Fuente: salida de RStudio.

```
fviz_pca_var(PC, repel = TRUE, axes = c(3, 4))
```

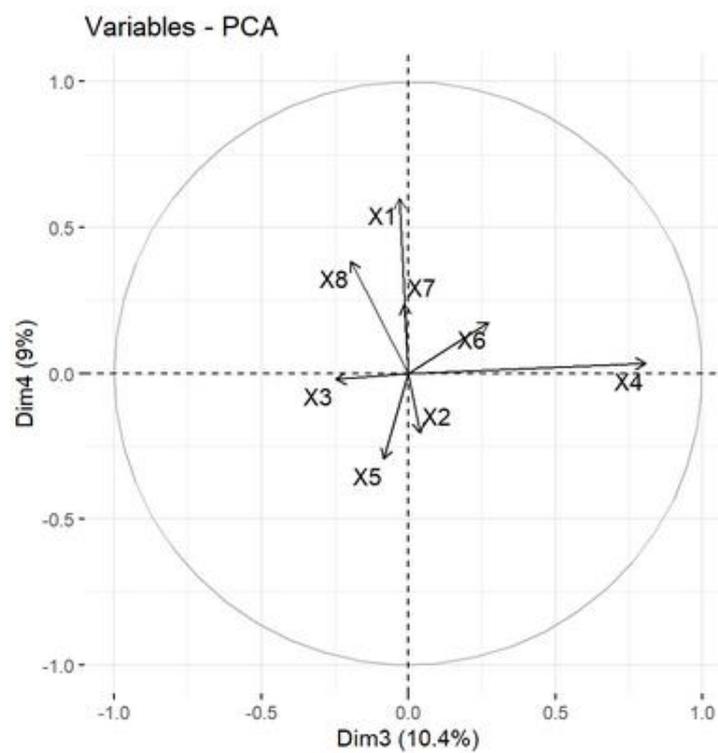
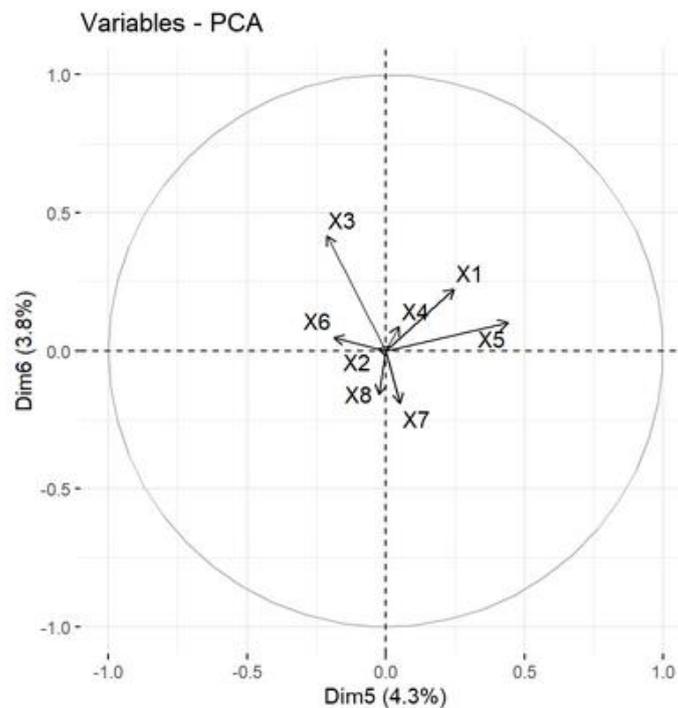


Figura A.3.2.13. Correlaciones en los ejes de los componentes (Dimensiones 3 y 4).**Fuente:** salida de RStudio.

```
fviz_pca_var(PC, repel = TRUE, axes = c(5, 6))
```

**Figura A.3.2.14.** Correlaciones en los ejes de los componentes (Dimensiones 5 y 6).**Fuente:** salida de RStudio.

```
fviz_pca_var(PC, repel = TRUE, axes = c(7, 8))
```

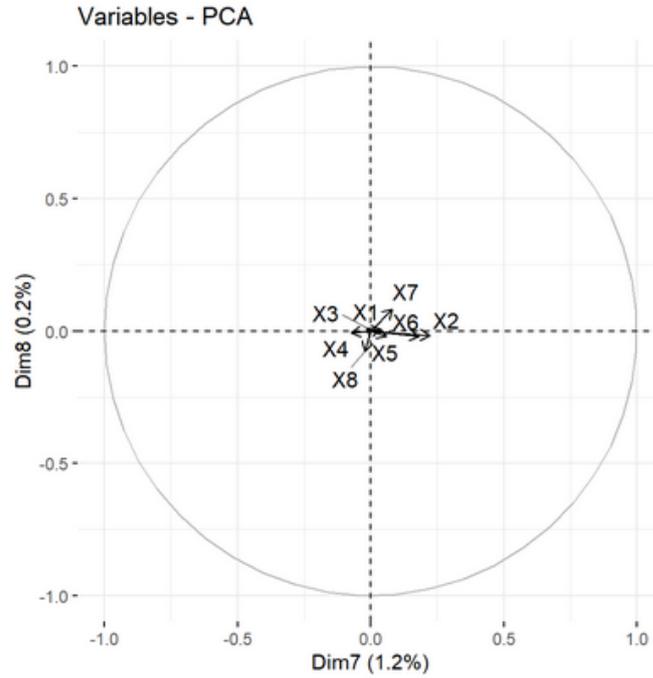


Figura A.3.2.15. Correlaciones en los ejes de los componentes (Dimensiones 7 y 8).

Fuente: salida de RStudio.

Representación alternativa

```
library(corrplot)
corrplot(variables_pca$coord, is.corr = FALSE, method = "square", addCoef
.col="black", number.cex = 0.75)
```

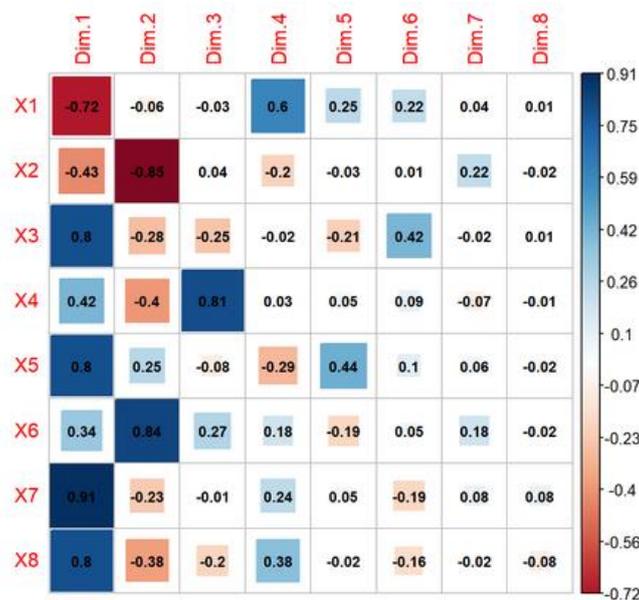


Figura A.3.2.16. Correlaciones en los ejes de los componentes (todas las dimensiones).

Fuente: salida de RStudio.

Análisis factorial

En el caso anterior se encontraron variables sintéticas que pueden sustituir a las variables originales, pero aún no se ha reducido la dimensión de la información. En este apartado se explicarán las características de la técnica de Componentes Principales, en cuanto a su uso dentro del Análisis Factorial.

El modelo factorial permite realizar la agrupación de las variables, garantiza la reducción de la dimensión del *dataframe* a nivel de variables. Existen “p” variables y “n” casos (la matriz X es de dimensión $n \times k$: $X_{n \times p}$). Hay “k” Factores comunes, en menor cantidad que las variables originales: ($k < p$), los F_j se denominan factores comunes al conjunto de variables del modelo y los ϵ_j representan los factores específicos de cada variable y los l_{ij} se denominan cargas factoriales (ecuaciones A.14 y A.15).

$$\begin{aligned} X_1 &= l_{11}F_1 + l_{12}F_2 + \dots + l_{1k}F_k + \epsilon_1 \\ X_2 &= l_{21}F_1 + l_{22}F_2 + \dots + l_{2k}F_k + \epsilon_1 \\ &\dots \\ X_p &= l_{p1}F_1 + l_{p2}F_2 + \dots + l_{pk}F_k + \epsilon_p \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

Matricialmente se puede escribir como:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11}F_1 + l_{12}F_2 + \dots + l_{1k} \\ l_{21}F_1 + l_{22}F_2 + \dots + l_{2k} \\ \dots \\ l_{p1}F_1 + l_{p2}F_2 + \dots + l_{pk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \dots \\ \epsilon_p \end{bmatrix} \quad (\text{A.15})$$

$$X = LF + \epsilon$$

Los supuestos del modelo son los siguientes (ecuaciones de la A.16 a la A.20):

- El valor esperado de las varianzas específicas son nulas:

$$E[\epsilon] = 0 \quad (\text{A.16})$$

- El valor esperado de los factores es nulo:

$$E[F] = 0 \quad (\text{A.17})$$

- Los factores son independientes entre sí (factores ortogonales):

$$E[F \cdot F'] = I \quad (\text{A.18})$$

- Las varianzas específicas son independientes entre sí:

$$E[\epsilon \cdot \epsilon'] = \Omega \quad (\text{A.19})$$

con Ω como matriz diagonal.

- La varianza común no está correlacionada con la varianza específica:

$$E[F \cdot \epsilon'] = 0 \quad (\text{A.20})$$

Cálculo de las comunalidades y especificidades, tipifica la matriz de información, la expresión matricial queda como: $Z = L \cdot F + \epsilon$ (ecuación A.21). De la definición de la matriz de correlación, cuya representación matricial se muestra en (ecuación A.29), se tiene que (ecuación A.22):

$$R_p = E[Z \cdot Z'] \quad (\text{A.22})$$

Se sustituye $Z=L \cdot F+\epsilon$ se tiene que (ecuación A.23):

$$R_p = E[(L \cdot F + \epsilon) \cdot (L \cdot F + \epsilon)'] \quad (\text{A.23})$$

Se expande dentro del operador de expectativas (ecuación A.24):

$$R_p = E[L \cdot F \cdot F' \cdot L' + L \cdot F \cdot \epsilon' + (L \cdot F \cdot \epsilon')' + \epsilon \cdot \epsilon'] \quad (\text{A.24})$$

Se aplica el operador de expectativas (ecuación A.25):

$$R_p = L \cdot E[F \cdot F'] \cdot L' + E[L \cdot F \cdot \epsilon'] + E[(L \cdot F \cdot \epsilon')'] + E[\epsilon \cdot \epsilon'] \quad (\text{A.25})$$

Se aplica los supuestos se tiene que (ecuación A.26):

$$R_p = L \cdot I \cdot L' + 0 + 0 + \Omega \quad (\text{A.26})$$

Por lo que se tiene que (ecuación A.27):

$$R_p = L \cdot L' + \Omega \quad (\text{A.28})$$

$$\begin{bmatrix} 1 & p_{12} & p_{13} & \dots & p_{1p} \\ p_{21} & 1 & p_{23} & \dots & p_{2p} \\ & & \dots & & \\ p_{p1} & p_{p2} & p_{p3} & \dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1k} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2k} \\ & & \dots & \\ l_{p1} & l_{p2} & \dots & l_{pk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1k} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2k} \\ & & \dots & \\ l_{p1} & l_{p2} & \dots & l_{pk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & \dots & 0 \\ & & \dots & \\ 0 & 0 & \dots & \omega_p^2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.29})$$

Al multiplicar $L \cdot L'$, sumar Ω e igualar los elementos de la diagonal principal, se tiene:

$$l = l_{j1}^2 + l_{j2}^2 + \dots + l_{jp}^2 + \omega_j^2 \quad (\text{A.30})$$

En resumen,

$$h_j^2 = l_{j1}^2 + l_{j2}^2 + \dots + l_{jp}^2 \quad (\text{A.31})$$

Donde:

- h_j^2 se denomina **comunalidad**, o varianza común de X_j derivada de los factores comunes (los F_j).
- ω_j^2 se denomina **especificidad**, o varianza específica, ocasionada por el factor específico de la variable el ϵ_j .

Extracción de los factores a través de Componentes Principales

Si se aplica la descomposición $R_p = V \cdot \Lambda \cdot V'$, con Λ como la matriz diagonal de autovalores y V como matriz de autovectores. Puede escribirse también así $R_p = V \cdot \Lambda^{1/2} \cdot \Lambda^{1/2} \cdot V'$. Se define $\phi = V \cdot \Lambda^{1/2}$, entonces puede reescribirse como $R_p = \phi \cdot \phi'$

Con ϕ como la correlación de las X con sus **Componentes Principales** se iguala a la expresión del modelo factorial se tiene que $\phi \cdot \phi' = L \cdot L' + \Omega$. A partir de las primeras "k" componentes, la varianza normalizada se puede obtener que $h_j^2 = l_{j1}^2 + l_{j2}^2 + \dots + l_{jk}^2$ y $\omega_j^2 = l_{j(k+1)}^2 + l_{jp}^2$ y debe cumplirse $1 = l_{j1}^2 + l_{jk}^2 + \dots + l_{j(k+1)}^2 + \dots + l_{jp}^2$.

Análisis factorial en R

```
library(psych)
library(corrplot)
library(dplyr)
#Modelo de 2 Factores (sin rotar)
numero_de_factores<-2
modelo_2_factores<-principal(r = Rx$r,
                             nfactors = numero_de_factores,
                             covar = FALSE,
                             rotate = "none")
modelo_2_factores
```

```
## Principal Components Analysis
## Call: principal(r = Rx$r, nfactors = numero_de_factores, rotate =
"none",
## covar = FALSE)
## Standardized loadings (pattern matrix) based upon correlation matrix
##      PC1  PC2  h2    u2 com
## X1 -0.72  0.06  0.53  0.472 1.0
## X2 -0.43  0.85  0.91  0.093 1.5
## X3  0.80  0.28  0.72  0.280 1.2
## X4  0.42  0.40  0.33  0.668 2.0
## X5  0.80 -0.25  0.70  0.302 1.2
## X6  0.34 -0.84  0.82  0.176 1.3
## X7  0.91  0.23  0.89  0.108 1.1
## X8  0.80  0.38  0.78  0.217 1.4
##
##
##              PC1  PC2
## SS loadings      3.75 1.93
## Proportion Var    0.47 0.24
## Cumulative Var    0.47 0.71
## Proportion Explained 0.66 0.34
## Cumulative Proportion 0.66 1.00
##
## Mean item complexity = 1.4
## Test of the hypothesis that 2 components are sufficient.
##
## The root mean square of the residuals (RMSR) is 0.09
##
## Fit based upon off diagonal values = 0.96
```

```
correlaciones_modelo<-variables_pca$coord
```

```
corrplot(correlaciones_modelo[,1:numero_de_factores],
is.corr = FALSE,
method = "square",addCoef.col="black",number.cex = 0.75)
```

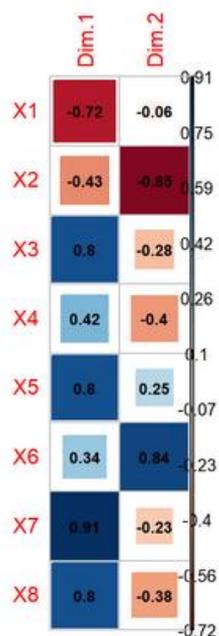


Figura A.3.2.17. Análisis factorial. Modelo 2 Factores.

Fuente: salida de RStudio.

```

library(psych)
library(corrplot)
library(dplyr)
#Modelo de 3 Factores (sin rotar)
numero_de_factores<-3
modelo_3_factores<-principal(r = Rx$r,
                             nfactors = numero_de_factores,
                             covar = FALSE,
                             rotate = "none")

modelo_3_factores

```

```

## Principal Components Analysis
## Call: principal(r = Rx$r, nfactors = numero_de_factores, rotate =
## "none",
## covar = FALSE)
## Standardized loadings (pattern matrix) based upon correlation matrix
##      PC1  PC2  PC3  h2   u2 com
## X1 -0.72  0.06 -0.03 0.53 0.472 1.0
## X2 -0.43  0.85  0.04 0.91 0.092 1.5
## X3  0.80  0.28 -0.25 0.78 0.219 1.4
## X4  0.42  0.40  0.81 0.98 0.017 2.0
## X5  0.80 -0.25 -0.08 0.71 0.295 1.2
## X6  0.34 -0.84  0.27 0.90 0.101 1.6
## X7  0.91  0.23 -0.01 0.89 0.108 1.1
## X8  0.80  0.38 -0.20 0.82 0.179 1.6
##
##
##              PC1  PC2  PC3
## SS loadings      3.75 1.93 0.84
## Proportion Var    0.47 0.24 0.10
## Cumulative Var    0.47 0.71 0.81
## Proportion Explained 0.58 0.30 0.13
## Cumulative Proportion 0.58 0.87 1.00
##
## Mean item complexity = 1.4
## Test of the hypothesis that 3 components are sufficient.
##
## The root mean square of the residuals (RMSR) is 0.08
##
## Fit based upon off diagonal values = 0.97

```

```

correlaciones_modelo<-variables_pca$coord

corrplot(correlaciones_modelo[,1:numero_de_factores],
         is.corr = FALSE,
         method = "square",addCoef.col="black",number.cex = 0.75)

```

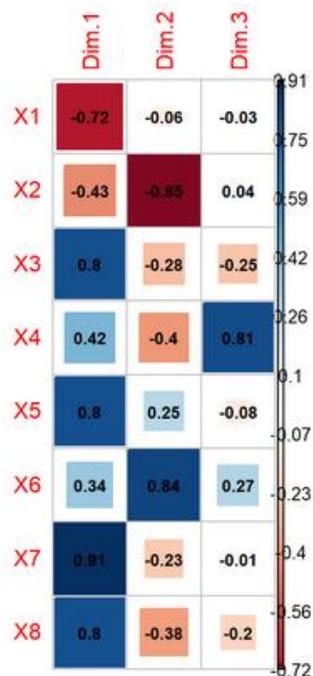


Figura A.3.2.18. Análisis factorial. Modelo 3 Factores.

Fuente: salida de RStudio.

```

library(psych)
library(corrplot)
library(dplyr)
#Modelo de 4 Factores (sin rotar)
numero_de_factores<-4
modelo_4_factores<-principal(r = Rx$r,
                             nfactors = numero_de_factores,
                             covar = FALSE,
                             rotate = "none")

modelo_4_factores

## Principal Components Analysis
## Call: principal(r = Rx$r, nfactors = numero_de_factores, rotate =
## "none",
## covar = FALSE)
## Standardized loadings (pattern matrix) based upon correlation matrix
##      PC1  PC2  PC3  PC4  h2  u2 com
## X1 -0.72  0.06 -0.03  0.60  0.89  0.112  2.0
## X2 -0.43  0.85  0.04 -0.20  0.95  0.050  1.6
## X3  0.80  0.28 -0.25 -0.02  0.78  0.219  1.4
## X4  0.42  0.40  0.81  0.03  0.98  0.016  2.0
## X5  0.80 -0.25 -0.08 -0.29  0.79  0.208  1.5
## X6  0.34 -0.84  0.27  0.18  0.93  0.070  1.7
## X7  0.91  0.23 -0.01  0.24  0.95  0.052  1.3
## X8  0.80  0.38 -0.20  0.38  0.97  0.032  2.1
##
##
##      PC1  PC2  PC3  PC4
## SS loadings      3.75  1.93  0.84  0.72
## Proportion Var      0.47  0.24  0.10  0.09
## Cumulative Var      0.47  0.71  0.81  0.91
## Proportion Explained 0.52  0.27  0.12  0.10
## Cumulative Proportion 0.52  0.78  0.90  1.00
##
## Mean item complexity = 1.7

```

```
## Test of the hypothesis that 4 components are sufficient.
##
## The root mean square of the residuals (RMSR) is 0.04
##
## Fit based upon off diagonal values = 0.99
```

```
correlaciones_modelo<-variables_pca$coord

corrplot(correlaciones_modelo[,1:numero_de_factores],
  is.corr = FALSE,
  method = "square",addCoef.col="black",number.cex = 0.75)
```

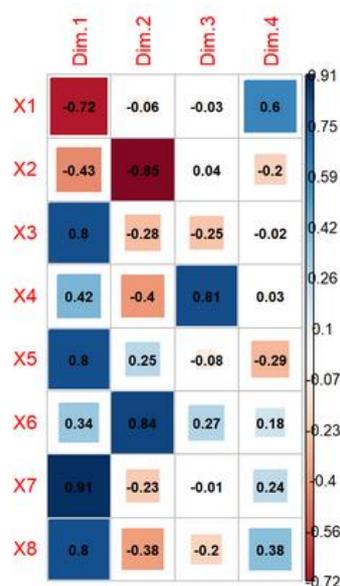


Figura A.3.2.19. Análisis factorial. Modelo 4 Factores.

Fuente: salida de RStudio.

Verificación de supuestos: Prueba de Barlett y KMO

Prueba de Esfericidad de Barlett

Esta prueba identifica si a nivel poblacional, las variables presentan independencia estadística (son ortogonales), a través de la matriz de correlación muestral R , y se verifica si a nivel poblacional dicha matriz de correlación corresponde a una matriz identidad, las hipótesis de la prueba son las siguientes:

$$\begin{cases} H_0: R \sim I \\ H_1: R \neq I \end{cases}$$

Si no se rechaza H_0 , no hay evidencia de multicolinealidad, caso contrario Si se rechaza H_0 hay evidencia de multicolinealidad El contraste se realiza a través de (ecuación A.31):

$$X_B^2 = -\left(n - 1 - \frac{2p+5}{6}\right) \ln(|R|) \quad (\text{A.31})$$

con $gl=p(p-1)/2$.

Rechazar H_0 si $X_B^2 \geq V.C.$, o si $p \leq \alpha$.

```
library(psych)
options(scipen = 99999)
Barlett<-cortest.bartlett(mat_X)
## R was not square, finding R from data

print(Barlett)

## $chisq
## [1] 99.52973
##
## $p.value
## [1] 0.0000000006035519
##
## $df
## [1] 28
```

Prueba de adecuación muestral de Kaiser Meyer Olkin (KMO) Se considerará adecuado el uso del Análisis Factorial si $KMO > 0.5$, de lo contrario no. con *Psych*.

```
library(psych)
KMO<-KMO(mat_X)
print(KMO)

## Kaiser-Meyer-Olkin factor adequacy
## Call: KMO(r = mat_X)
## Overall MSA = 0.5
## MSA for each item =
##   X1   X2   X3   X4   X5   X6   X7   X8
## 0.75 0.42 0.62 0.53 0.50 0.35 0.51 0.43
```

Con *rela*.

```
library(rela)
KMO<-paf(as.matrix(mat_X))$KMO
print(KMO)

## [1] 0.49718
```

Anexo 3.4. Flujo de la información en el OBSAM-Costatenas

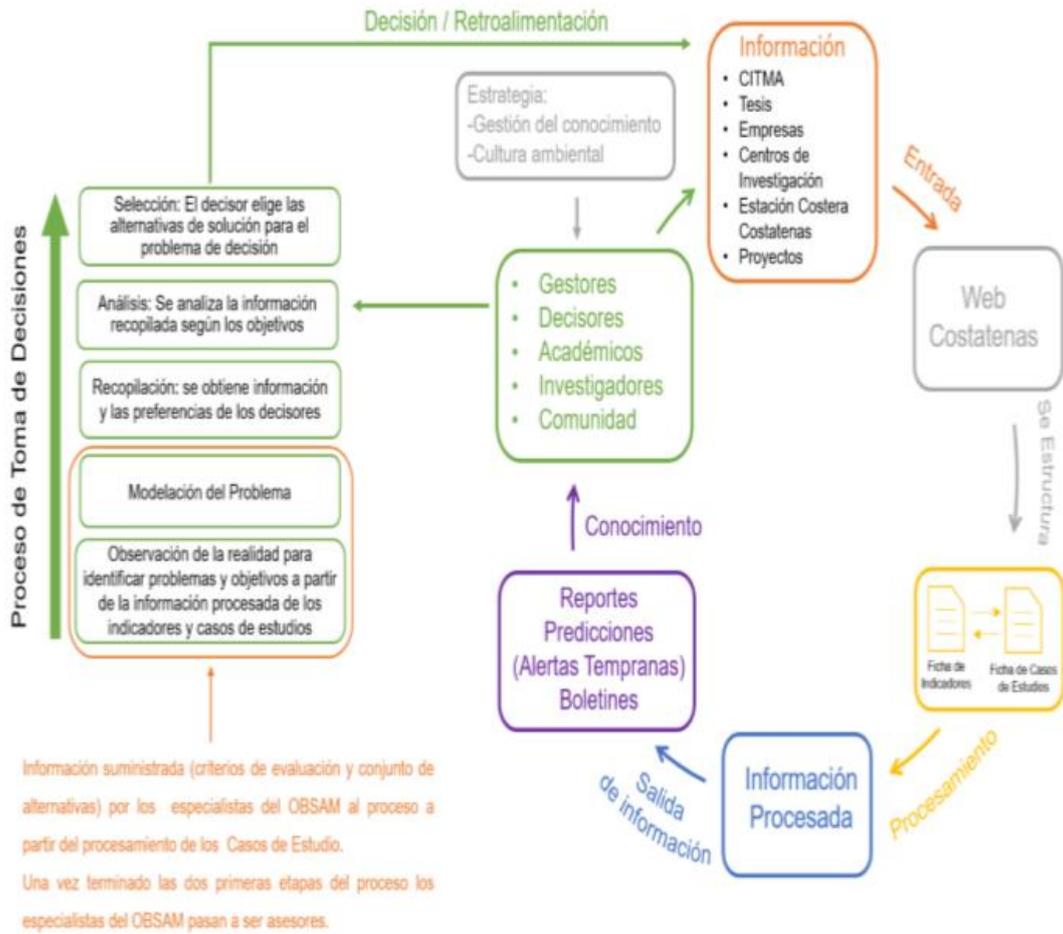


Figura A.3.3.1. Flujo de la información en el OBSAM-Costatenas.

Fuente: elaboración propia.