

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA ADMINISTRACIÓN PORTUARIA EN LA SOSTENIBILIDAD DE LOS PUERTOS MEDIANTE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

BEATRIZ MOLINA SERRANO

beatriz.molinas@alumnos.upm.es

*Universidad Politécnica de Madrid / Departamento de Ingeniería Civil. Transportes
Calle Ramiro de Maeztu, 7 28040 Madrid (España)*

NICOLETA GONZÁLEZ-CANCELAS

nicoleta.gcancelas@upm.es

*Universidad Politécnica de Madrid / Departamento de Ingeniería Civil. Transportes
Calle Ramiro de Maeztu, 7 28040 Madrid (España)*

FRANCISCO SOLER-FLORES

f.soler@upm.es

*Universidad Politécnica de Madrid / Departamento de Matemáticas e Informática aplicadas a la Ingeniería Civil y Naval
Calle Ramiro de Maeztu, 7 28040 Madrid (España)*

Recibido (15/03/2017)

Revisado (19/09/2017)

Aceptado (29/09/2017)

RESUMEN: En la explotación y gestión portuaria se barajan numerosas variables, necesitando conocer las relaciones entre ellas para modificar las condiciones de explotación. El uso de redes bayesianas permite clasificar, predecir y diagnosticar dichas variables, estimando también la probabilidad posterior de las no conocidas en base a las conocidas. Así, a nivel de planificación, no es necesario conocer todas las variables conociendo sus relaciones, puesto que las redes bayesianas permiten introducir posibles acciones y la utilidad de sus resultados, lo que hace que puedan usarse en la toma de decisiones.

En el estudio se ha generado una base de datos con más de 100 variables portuarias, clasificadas en económicas, sociales, ambientales e institucionales, tal y como se hace en los estudios de smart ports realizados para el Sistema Portuario Español. A partir de ella se ha creado una red, empleando un grafo dirigido acíclico para conocer las relaciones entre variables en términos de padres e hijos. De dicha red se observa que las variables económicas son la causa del resto de tipologías, ejerciendo de padres en la mayoría de los casos. Asimismo, también se deduce que conocidas las variables ambientales, la red permite estimar la probabilidad posterior de las sociales. Así, se puede concluir que las redes bayesianas permiten modelar la incertidumbre de forma probabilística incluso con un número elevado de variables.

Palabras clave: Variables portuarias; Sostenibilidad; Puerto; Gestión portuaria; Nodo; Redes bayesianas.

ABSTRACT: Numerous variables are discussed in the port operation and management, needing to know relationships between them to modify the operating conditions. Use of Bayesian networks makes possible to classify, predict and diagnose these variables, also estimating posterior probability of unknown ones based on known ones. Thus, at the planning level, it is not necessary to know all variables in knowing their relationships, being able to use Bayesian networks to make decisions, introducing possible actions and usefulness of their results.

Present study has generated a database with more than 100 port variables, classified as in smart ports studies in the Spanish Port System in four categories: economic, social, environmental and institutional. After that, a network has been generated using a non-cyclic conducted grafo to know relations between variables in terms of parents and sons. From this network it is observed that economic variables are cause of the other typologies, practicing parents in most of the cases. Also, knowing the environmental variables, network allows to estimate posterior probability of the social ones. Thus, it is concluded that the Bayesian networks allow to model uncertainty probabilistically even with a large number of variables.

Keywords: Port variables; Sustainability; Port; Port management; Node; Bayesian networks.

1. Introducción

El concepto de desarrollo sostenible partió de la búsqueda de compatibilidad entre el desarrollo económico y la protección y uso adecuado de los recursos naturales. Esta visión fue ampliándose a otras dimensiones, de forma que actualmente, el concepto de desarrollo sostenible posee un carácter integral, multidimensional e interactivo [1].

Este concepto de sostenibilidad está siendo aplicado en forma emergente por autoridades del sector transporte y muchos otros campos de actividad e industrias a nivel mundial, fuertemente impulsada por iniciativas que incorporan la variable ambiental y la responsabilidad social empresarial en la gestión estratégica de las empresas [2]. En el caso de los puertos, la sostenibilidad portuaria tiene sus raíces en las propuestas del Global Reporting Initiative (en adelante GRI) [3] de las cuáles conserva, entre otras cuestiones, los cuatro ejes o dimensiones que conforman un enfoque de desarrollo sostenible, es decir, el institucional, el económico, el ambiental y el social (Figura 1).

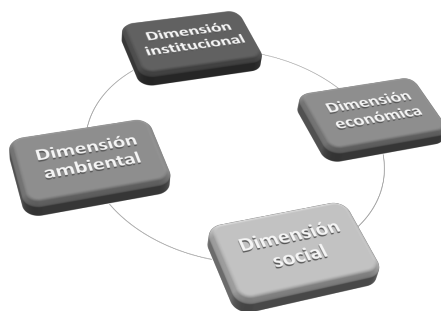


Figura. 1. Dimensiones de la sostenibilidad portuaria
Fuente: Elaboración propia a partir de [2]

De esta forma se considera que la gestión sostenible de una empresa u organismo tiene como meta el mantenimiento equilibrado en el largo plazo de su función y actividad, de modo que se tengan en cuenta el efecto recíproco de su actividad con el entorno económico, social y ambiental con el que se relaciona y el efecto de su actividad con su propia estructura al tiempo que se el efecto de sus funciones y actividades en sus aspectos o dimensiones económica, social, medioambiental e institucional, buscando un desarrollo equilibrado de estas cuatro dimensiones [4].

En este contexto, merece una atención particular el transporte marítimo, al transportar alrededor del 80% del volumen del comercio internacional (en toneladas-kilómetros) a nivel mundial [5]. Así, en el sector portuario, se debe entender la gestión sostenible como “aquella que permite que crezca el volumen de tráfico de contenedores, graneles sólidos y líquidos, mercancía general y número de pasajeros, disminuyendo a su vez el consumo de energía y recursos naturales, el volumen de residuos generados y los impactos negativos a los sistemas sociales y ecosistemas en las áreas de influencia del puertos” [6].

Sin embargo, uno de los principales desafíos que plantea la introducción de criterios de sostenibilidad en el modelo de gestión y desarrollo portuario es romper la inercia existente en relación a la consideración “única” del factor económico como variable de desarrollo, y lograr que las variables ambiental y social tomen la importancia que deben a fin de que el modelo de gestión y desarrollo portuario realmente tienda hacia la sostenibilidad [7].

El sistema portuario español se compone de 28 Autoridades Portuarias que gestionan 46 puertos de interés general en un régimen avanzado de autonomía de gestión. Las terminales se explotan mediante concesiones demaniales, pudiendo realizarse también mediante concesión de obra pública, lo que

caracteriza la explotación de las terminales de contenedores con un sistema concesional mediante empresas privadas [8].

El Texto Refundido de la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante (BOE núm. 253, de 20/10/2011), incorpora la sostenibilidad como uno de los principios que deben regir el modelo de planificación y de gestión de los puertos. Para ello, en el artículo 55.4 prevé que el proyecto de Plan de Empresa de cada Autoridad Portuaria debe acompañarse de una Memoria de Sostenibilidad, la cual constituye una herramienta de análisis y diagnóstico. Dicha memoria se lleva a cabo a través de una metodología, basada en el GRI a la cual se incorpora la constitución de indicadores específicos, y es aprobada por Puertos del Estado y las Autoridades Portuarias. La redacción de estas Memorias de Sostenibilidad, supone un esfuerzo de integración de información sobre el comportamiento de la Autoridad Portuaria y su desempeño ambiental, económico y social, si bien no determinan el comportamiento de la misma, sino que describe, por medio de indicadores de desempeño, los resultados derivados de la adopción y aplicación de códigos, políticas y sistemas de gestión [9].

Estos indicadores de sostenibilidad permiten evaluar el desempeño de la gestión de desarrollo sostenible, más allá de los reportes de sostenibilidad, los indicadores permiten controlar de manera objetiva la marcha de la gestión de la Autoridad Portuaria en esta materia. Por ello, resulta obvio que los indicadores deben cubrir las cuatro dimensiones de la sostenibilidad. La aplicación de los indicadores es útil para que las Autoridades Portuarias controlen su gestión sostenible, evalúen el impacto de los programas aplicados y los modifiquen cuando sea necesario. Los indicadores permiten realizar Benchmarking de gestión sostenible entre puertos para determinar las mejores prácticas y comparar el desempeño de una Autoridad Portuaria frente a la industria similar, y en el marketing puede ser un elemento diferenciador y de competitividad en el mercado. La aplicación generalizada a un sistema portuario permitiría realizar un benchmarking preciso en materia de sostenibilidad entre puertos de una misma región o país [10].

En los estudios que realizan una medición analítica, la definición de los indicadores y su proceso de elaboración y obtención vienen determinados por los objetivos de los mismos y las preferencias de los analistas, lo que pone de manifiesto la inexistencia de un único procedimiento metodológico [11].

De la aplicación de dichas herramientas surgen los objetivos (económicos, medio ambientales, sociales e institucionales) que una autoridad o empresa portuaria debe alcanzar para asegurar el desarrollo sostenible y crecimiento de su puerto [12]. Los objetivos económicos pueden ser: el incremento del volumen de negocio, aumentar los ingresos por concesiones, reducir el endeudamiento con el fin de asegurar la sostenibilidad financiera del puerto y optimizar y rentabilizar las inversiones de los activos portuarios. En el caso de la dimensión medio ambiental, los objetivos pueden ser tales como accionar con respeto al medio ambiente, minimizar los impactos ambientales derivados de la actividad portuaria, minimizar los accidentes ambientales y mejorar la gestión ambiental en el recinto portuario.

Los objetivos sociales que pueden ser internos y externos, deben estar enmarcados en ámbitos tales como desarrollar y modernizar sistemas de gestión de los recursos humanos, desarrollar un equipo humano motivado y comprometido y lograr un respaldo sostenido y activo de la comunidad del entorno. Para los objetivos institucionales se puede estar buscando impulsar ciertos cambios legales y normativos para modernizar la forma de desarrollo y operación del puerto, reorganizar el mercado portuario incorporando competencia, gestión e inversión privada para mejorar su eficiencia y capacidad de expansión, modernizar el régimen laboral para mejorar su competitividad, desarrollar la comunidad portuaria para incrementar la eficiencia operacional y calidad de los procesos, institucionalizar y optimizar la relación ciudad puerto, expandir la gestión operativa del puerto a la cadena logística para agregar valor e integrar a la comunidad logística local al desarrollo del puerto (Figura 2).

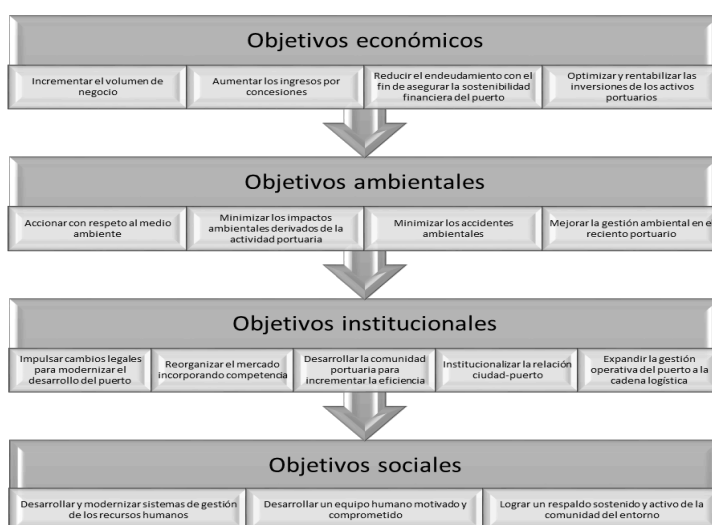


Figura. 2. Objetivos estratégicos de las dimensiones de la sostenibilidad portuaria
Fuente: Elaboración propia a partir de Doerr, 2011.

Por tanto, el objetivo que se persigue es que través de estos cuatro ejes de la sostenibilidad, los puertos se conformen como un sistema y no sean vistos como entes aislados y sujetos a una coyuntura comercial concreta, sino como elementos que se interrelacionan con un entorno físico, social y ambiental, en el que han de integrarse de forma efectiva, esto es, siendo capaces de adaptarse a una coyuntura cambiante y a la vez, apuntando a una renovación que contribuya a alcanzar el mejor de los escenarios futuros posibles [13].

Sin embargo, una fuerte limitación metodológica no ha permitido una más extensa aplicación del concepto. Aún es una cuestión crítica y no resuelta para la gestión del desarrollo sostenible, la disponibilidad de metodologías que permitan evaluar el impacto del accionar de las instituciones y empresas en cada una de las dimensiones de la sostenibilidad, determinando el valor y las variables que cuantifiquen la verdadera contribución o aporte de esa gestión al desarrollo sostenible.

Una de las metodologías a emplear son las Redes Bayesianas, a partir de las cuales se puede obtener de una forma gráfica las relaciones entre las variables consideradas de cada una de las cuatro dimensiones, con objeto de poder determinar a posteriori los valores que cuantifiquen su contribución a la sostenibilidad.

En la tabla siguiente (Tabla 1), se incluyen los principales trabajos sobre sistemas de transportes que han sido desarrollados usando Redes Bayesianas:

Tabla 1. Principales trabajos sobre sistemas de transportes desarrollados usando Redes Bayesianas

Ref. bibliográfica	Autores	Año	Título
[14]	N. Friedman & M. Goldszmidt	1996	Building classifiers using Bayesian networks
[15]	S. Jara-Díaz, E. Martínez-Budría, C. Cortes & A. Vargas	1997	Marginal costs and scale economies in Spanish ports
[16]	C. Tebaldi & M. West	1998	Bayesian inference on network traffic using link count data
[17]	J. Cain.	2001	Planning improvements in natural resource management. guidelines for using Bayesian networks to support the planning and management of development programmes in the water sector and beyond
[18]	C. Conati, A. Gertner y K. Vanlehn	2002	Using Bayesian networks to manage uncertainty in student modeling. User Modeling and User-Adapted

Ref. bibliográfica	Autores	Año	Título
			Interaction
[19]	J. Bromley, N. A. Jackson, O. J. Clymer, A. M. Giacomello & F. V. Jensen	2005	The use of hugin® to develop Bayesian networks as an aid to integrated water resource planning
[20]	S. Sun, C. Zhang & G. Yu.	2006	A Bayesian network approach to traffic flow forecasting
[21]	W. Zheng, D. H. Lee & Q. Shi	2006	Short-term freeway traffic flow prediction: Bayesian combined neural network approach
[22]	D. Janssens, G. Wets, T. Brijs, K. Vanhoof, T. Arentze & H. Timmermans	2006	Integrating Bayesian networks and decision trees in a sequential rule-based transportation model
[23]	E. Castillo, J. M. Menéndez & S. Sánchez-Cambroneró.	2008	Traffic estimation and optimal counting location without path enumeration using Bayesian networks
[24]	E. Castillo, J. M. Menéndez & S. Sánchez-Cambroneró	2008	Predicting traffic flow using Bayesian networks
[25]	P. Trucco, E. Cagno, F. Ruggeri & O. Grande	2008	A Bayesian Belief Network modelling of organisational factors in risk analysis: A case study in maritime transportation
[26]	E. Klemola, J. Kuronen, J. Kalli, T. Arola, M. Hanninen, A. Lehikoinen & U. Tapaninen, U.	2009	A cross-disciplinary approach to minimising the risks of maritime transport in the Gulf of Finland.
[27]	P. Kaluza, A. Kölzsch, M. T. Gastner & B. Blasius.	2010	The complex network of global cargo ship movements.
[28]	A. Hofleitner, R. Herring, P. Abbeel & A. Bayen	2012	Learning the dynamics of arterial traffic from probe data using a dynamic Bayesian network
[8]	N. G. Cancelas, F. S. Flores & A. C. Orive	2013	Modelo de eficiencia de las terminales de contenedores del sistema portuario español
[29]	A. Camarero, N. González-Cancelas, F. Soler & I. López	2013	Utilización de redes bayesianas como método de caracterización de parámetros físicos de las terminales de contenedores del sistema portuario español
[30]	F. S. Flores, N. G. Cancelas, A. C. Orive, J. L. A. Gárate & M. D. C. P. Monzón	2014	Diseño de un modelo de planificación de zonas de actividades logísticas mediante el empleo de redes bayesianas
[31]	K. X. Li, J. Yin, H. S. Bang, Z. Yang & J. Wang	2014	Bayesian network with quantitative input for maritime risk analysis

2. Metodología seguida

Con objeto de construir una red bayesiana se ha desarrollado la metodología representada en la Figura 3. Dicha metodología se divide en dos tareas: la primera para determinar el escenario de trabajo y la segunda para desarrollar el modelo de inteligencia artificial.

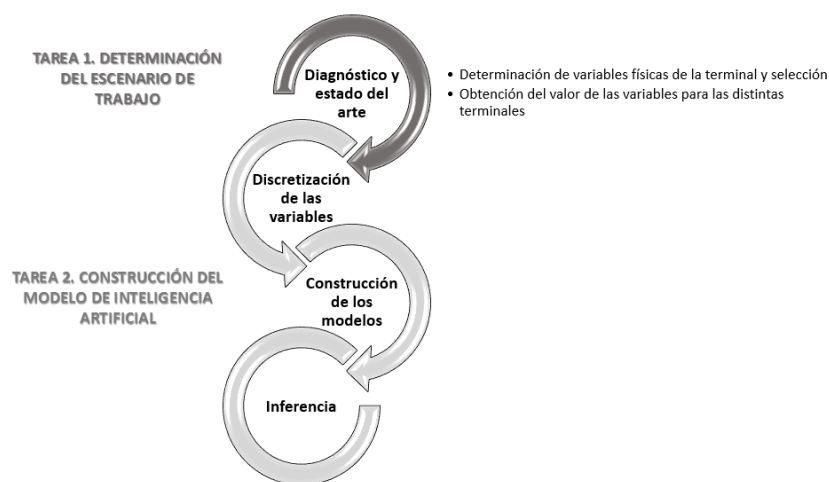


Figura 3. Esquema de la metodología empleada

Las redes bayesianas son una representación gráfica de dependencias para razonamiento probabilístico, en la cual los nodos representan variables aleatorias y los arcos representan relaciones de dependencia directa entre las variables [32]. Estas redes están diseñadas para hallar las relaciones de dependencia e independencia entre todas las variables que conforman el dominio de estudio. Basado en

ello, se utilizan métodos de razonamiento probabilístico que permiten realizar predicciones sobre el valor de cualquier variable desconocida basados en los valores de las conocidas [32].

Las redes bayesianas proveen una forma compacta de representar el conocimiento y métodos flexibles de razonamiento -basados en las teorías probabilísticas- capaces de predecir el valor de variables no observadas y explicar las observadas. Entre las características que poseen las redes bayesianas se puede destacar que permiten aprender sobre relaciones de dependencia y causalidad, permiten combinar conocimiento con datos y pueden manejar bases de datos incompletas [33].

Las redes bayesianas pueden realizar la tarea de clasificación -caso particular de predicción- que se caracteriza por tener una sola de las variables de la base de datos (clasificador) que se desea predecir, mientras que todas las otras son los datos propios del caso que se desea clasificar. Así, el objetivo es obtener el valor más probable de una variable dados los valores de otras, fundamentándose para ello en el teorema de Bayes. Dicho teorema se basa en que la presencia de una característica particular no guarda relación con el hecho de que también haya presentes otras características, de forma que si se tienen distintas características para un elemento, cada una afecta de una forma independiente a dicho elemento. Por tanto, pueden existir una gran cantidad de variables en la base de datos, algunas de las cuales estén directamente relacionadas con la variable clasificadora pero también otras variables que tienen una influencia directa sobre dicha clase.

El obtener una red bayesiana a partir de datos es un proceso de aprendizaje que se divide en dos etapas: el aprendizaje estructural y el aprendizaje paramétrico [33]. La primera de ellas consiste en obtener la estructura de la red bayesiana, es decir, las relaciones de dependencia e independencia entre las variables involucradas. La segunda etapa tiene como finalidad obtener las probabilidades a priori y condicionales requeridas a partir de una estructura dada.

2.1. Tarea 1: determinación del escenario de trabajo

2.1.1 Diagnóstico y estado del arte

Consiste en la revisión del estado del arte para identificar el conjunto de variables de medida de la sostenibilidad, mediante el empleo de buscadores especializados y gestores de aplicaciones.

2.1.2 Determinación de las variables físicas de la terminal y selección

Se realiza un estudio las variables de sostenibilidad susceptibles de investigación para los puertos marítimos. Dada la variabilidad de las terminales y puertos componen el sistema portuario español se debe recurrir a las memorias de sostenibilidad de las autoridades portuarias del sistema portuario español.

2.1.3 Obtención del valor de las variables

El Sistema Portuario español de titularidad estatal está integrado por 46 puertos de interés general, gestionados por 28 Autoridades Portuarias, cuya coordinación y control de eficiencia corresponde al Organismo Público Puertos del Estado, órgano dependiente del Ministerio de Fomento y que tiene atribuida la ejecución de la política portuaria del Gobierno (www.puertos.es/es-es). Los valores de las variables con las que se trabaja para la construcción del modelo de la red bayesiana corresponden a los datos de las Memorias de Sostenibilidad publicadas anualmente por las Autoridades Portuarias de los puertos españoles y completados con información suministrada por el Organismo Público Puertos del Estado, corresponden al registro histórico desde el año 2010, contando con casi 3.000 registros

A través de las memorias de sostenibilidad, Puertos del Estado y las Autoridades Portuarias materializan su compromiso con la transparencia en su gestión; proporcionando una visión amplia de sus logros y retos en aspectos como la competitividad, la calidad en la prestación de servicios, la eficiencia en el uso de recursos y su impacto sobre su entorno, económico, social y natural. La Memoria se divide en cuatro dimensiones: institucional, económica, ambiental y social, de acuerdo también a la Guía para la elaboración de las memorias de sostenibilidad de las autoridades portuarias aprobada por Puertos del

Estado. En cada apartado se describe el enfoque que las Autoridades Portuarias desarrollan para su adecuada gestión y se informa sobre los resultados conseguidos, mediante los correspondientes indicadores.

Las variables seleccionadas en el estudio se incluyen en la Tabla 2, la cual se muestra a continuación:

Tabla 2. Relación de variables empleadas en el trabajo

	ID	Marca temporal	Descripción
Dimensión Institucional (ID: dimins): Conjunto de objetivos e indicadores de sostenibilidad que reflejan prioridades estratégicas en el ámbito de la sostenibilidad para el conjunto del sistema portuario de interés general	herramgestion_dimins	Herramientas de apoyo a la gestión	Sistemas de gestión de apoyo a la toma de decisiones: sistemas de gestión de la calidad, cuadros de mando integral, campañas de caracterización de mercados, etc.
	geninfraortuaria_dimins	Generación de infraestructura portuaria	Papel de la Autoridad Portuaria como proveedor de la infraestructura
	mercservidos_dimins	Mercados servidos	Estructura y evolución de los principales tráfico de mercancías
	dinamact_dimins	Papel del sector portuario como dinamizador de la actividad productiva	Principales sectores o actividades relevantes en el desarrollo económico local que se apoyan en el puerto para su desarrollo
	serviciosconcautos_dimins	Servicios y concesiones/autorizaciones	Tipos, marco de prestación y regulación
	inicprivada_dimins	Presencia de la iniciativa privada	Número de empresas que operan en el puerto, superficie terrestre ocupada, caracterizada como uso comercial concesionado, etc.
	transconcu_dimins	Transparencia y libre competencia	Iniciativas dirigidas a garantizar que todo operador que desee prestar servicios en el puerto u optar a una concesión pueda conocer de modo transparente las condiciones para operar en el puerto y los mecanismos administrativos que regulan dicho proceso
	calidserv_dimins	Calidad en la prestación de los servicios	Iniciativas promovidas por la Autoridad Portuaria dirigidas a mejorar la eficiencia, la calidad del servicio y el rendimiento de los servicios prestados a la mercancía
	intetrans_dimins	Integración de los puertos en el sistema de transporte	Eficiencias con la que son coordinados los diferentes modos de transporte que confluyen en el puerto
Dimensión económica (ID: dimecon): Situación económico financiera del sistema portuario español	sitecoffin_dimecon	Situación económica financiera	Entre otros indicadores: rentabilidad sobre activos, EBIDTA/tonelada, servicio de la deuda, relación gastos de explotación e ingresos de explotación, etc.
	inv_dimecon	Nivel y estructura de las inversiones	Entre otros indicadores: inversión pública en relación con el cash-flow, inversión ajena frente a la inversión pública, renovación de activos
	negserv_dimecon	Negocio y servicios	Entre otros indicadores: ingresos por tasas de ocupación y actividad, uso comercial de la superficie, uso de los muelles, etc.
	vgenprod_dimecon	Valor generado y productividad	Entre otros indicadores: productividad del trabajo según ingresos, productividad del trabajo según EBIDTA, etc.
Dimensión social (ID: dimsoci): capital humano y empleo	caphum_dimsoci	Capital humano de la actividad portuaria	Empleo, comunicación interna y participación, formación, estructura de plantilla y equidad, seguridad y salud en el trabajo, etc.
	empl_dimsoci	Empleo y seguridad laboral en la comunidad portuaria	Empleo en la comunidad portuaria, seguridad laboral y formación en servicios y concesiones portuarios, etc.
Dimensión medioambiental (ID: dimma): calidad y gestión ambiental	gestamb_dimma	Gestión ambiental	Grados de implantación de los sistemas de gestión ambiental (EMAS, ISO 14001 y PERLS) y recursos económicos invertidos gastos, así como inversiones en su caso, asociados a la implantación, certificación y mantenimiento de un sistema de gestión ambiental
	calaire_dimma	Calidad del aire	Principales focos de emisión del puerto que suponen emisiones significativas, evolución del número de quejas o denuncias registradas por la Autoridad Portuarias procedentes de grupos de interés relativas a emisiones de polvo o a la calidad del aire en general, medidas

ID	Marca temporal	Descripción
calagua_dimma	Calidad del agua	implantadas por la Autoridad Portuaria para controlar las emisiones ligadas a la actividad del conjunto del puerto Principales focos de vertido situados en el puerto que tienen un impacto significativo en la calidad del agua y sedimentos de las dársenas del puerto, medidas implantadas por la Autoridad Portuaria para controlar las emisiones ligadas a la actividad del conjunto del puerto, superficie de la zona de servicio que cuenta con recogida y tratamiento de aguas residuales
calacust_dimma	Calidad acústica	Principales focos de emisión (puntuales y difusos) del puerto que suponen emisiones acústicas significativas, evolución del número de quejas o denuncias registradas por la Autoridad Portuaria procedentes de grupos de interés, elaboración de mapa de ruido y plan de acción acústica
residuos_dimma	Gestión de residuos	Residuos generados por la Autoridad Portuaria que son segregados y valorizados, actividades o fuentes de generación de residuos dentro del puerto, iniciativas promovidas por la Autoridad Portuaria para la mejora de la gestión de residuos de la comunidad portuaria
ecoeff_dimma	Ecoeficiencia	Eficiencia en el uso del suelo, consumo de agua y energía eléctrica por la Autoridad Portuaria
comport_dimma	Comunidad portuaria	Condiciones o exigencias sobre aspectos ambientales en los pliegos de prescripciones técnicas particulares de los servicios portuarios, en términos de otorgamiento y en títulos de concesión o autorización

Una vez construida la base de datos, se debe elegir entre dos tipos de modelos: directos o indirectos. Los modelos directos tienen una noción más compleja de independencia que los modelos indirectos, pero tienen, en cambio, varias ventajas, siendo la principal que se puede crear un arco desde A hasta B para indicar que A es la “causa” de B, lo cual se puede usarse para crear la estructura de grafo. Es por ello que los modelos directos pueden codificar relaciones determinísticas, siendo más fáciles de aprender (encajar los datos).

Asimismo, también es necesario especificar los parámetros del modelo para así poder definir la estructura del grafo. En el caso de modelos directos de Distribución Condicional de la Probabilidad (CPD), dicha definición se debe especificar para cada uno de los nodos. En el caso de que las variables sean discretas, se deben representar como en la tabla (CPT), es decir, definiendo la probabilidad que un nodo hijo tiene para cada uno de los diferentes valores para cada una de las combinaciones de valores de sus nodos padres.

2.2. Tarea 2: construcción del modelo de inteligencia artificial

Los modelos gráficos de probabilidad son grafos en los cuales los nodos representan variables aleatorias y en los que la existencia o la falta de arcos representan supuestos de independencia condicional. Por lo tanto, proporcionan una representación completa de la articulación de las distribuciones de la probabilidad. Los modelos gráficos indirectos, también llamados Campos aleatorios de Markov (MRFs) o Redes de Markov, cuenta con una definición simple de independencia: dos nodos o conjunto de nodos, A y B, son condicionalmente independientes considerando un tercer conjunto (C), si todos los caminos existentes entre los nodos A y B están separados por un nodo en C. Por el contrario, los modelos gráficos directos, también llamados Redes Bayesianas o Redes de Creencias (BNs), cuentan con una noción más compleja de independencia, la cual tiene en cuenta la direccionalidad de los arcos, tal y como se explica a continuación [34].

Los modelos gráficos de tipo indirectos son más populares en el caso de comunidades físicas y de visión, mientras que los modelos directos lo son en comunidades AI y estadísticas. No obstante, es posible tener un modelo en el cual se incluyen arcos directos e indirectos, denominándose a este modelo como Grafo encadenado. Para realizar un estudio más exhaustivo de las relaciones entre los modelos gráficos directos e indirectos, revisar las siguientes referencias: Castillo, Gutiérrez and Hadi, 1997 [35], Duda, Hart and Stork, 2001 [36] y Pearl, 1982 [37].

Con objeto de especificar la Red Bayesiana y así representar totalmente las uniones en la distribución de la probabilidad, se necesita definir la distribución de la probabilidad condicionada de X hacia sus padres en cada uno de los nodos X . La distribución condicional de X hacia sus padres puede adoptar cualquier forma. Es muy común el uso de distribuciones discretas o Gaussianas cuando esto simplifica los cálculos. Otras veces, sólo se conocen las restricciones de la distribución, en cuyo caso, se puede usar el máximo principio de la entropía para definir una distribución sencilla: tomar el que tiene una mayor entropía de las restricciones. De forma análoga, en el contexto específico de una Red Bayesiana dinámica, es habitual que se especifique la distribución condicional del estado oculto de la evolución temporal para maximizar el ratio de proceso estocástico implícito.

A menudo, estas distribuciones condicionales incluyen parámetros que son desconocidos y deben ser estimados a partir de los datos. Algunas veces, los parámetros se estiman usando el enfoque de máxima verosimilitud. La maximización de la verosimilitud (o probabilidad posterior) de forma directa resulta generalmente complejo cuando existen variables no observables. Un enfoque típico de este problema es el algoritmo de expectación-maximización. Este algoritmo alterna el cálculo de los valores esperados de las variables no observadas, que se determinan a partir de los datos observados, y la maximización de la verosimilitud completa (o posterior), considerando que los valores esperados calculados previamente son correctos. Bajo condiciones de regularidad suave, este proceso converge en valores de parámetro de máxima verosimilitud (o máximo posterior).

Un enfoque más profundo de los parámetros bayesianos es tratar a los parámetros como variables no observadas adicionales y computarlas en una distribución completa posterior con todos los nodos condicionales sobre los datos observados, con objeto de sacar los parámetros. Este enfoque puede ser costoso y conducir a modelos de gran dimensión, por lo que en la práctica es más común el uso de métodos clásicos de parametrización.

Como ya se ha indicado, una Red Bayesiana es un grafo acíclico dirigido. Se puede interpretar, por tanto, una Red Bayesiana de dos formas:

- Distribución de probabilidad: Representa la distribución de la probabilidad conjunta de las variables representadas en la red.
- Base de reglas: cada arco representa un conjunto de reglas que asocian a las variables involucradas. Dichas reglas están cuantificadas por las probabilidades respectivas.

La estructura de una Red Bayesiana se puede determinar de la siguiente manera:

- (1) Se asigna un vértice o nodo a cada variable (X_j) y se indica de qué otros vértices es una causa directa; a ese conjunto de vértices “causa del nodo (X_j)” se lo denota como el conjunto π_{X_j} y se lo llamará “padres de X_j ”.
- (2) Se une cada padre con sus hijos con flechas que parten de los padres y llegan a los hijos.
- (3) A cada variable X_j se le asigna una matriz $P(X_j|\pi_{X_j})$ que estima la probabilidad condicional de un evento $X_j = x_j$ dada una combinación de valores de los π_{X_j} . Las Redes Bayesianas permiten definir modelos y utilizarlos tanto para hacer razonamiento de diagnóstico (pues obtienen las causas más probables dado un conjunto de síntomas), como para hacer razonamiento predictivo (obteniendo la probabilidad de presentar un cierto síntoma suponiendo que existe una causa conocida). Una de las características de las Redes Bayesianas es que un mismo nodo puede ser fuente de información u objeto de predicción dependiendo de cuál sea la evidencia disponible. A continuación se muestran cuáles son las características de estos dos tipos de inferencia utilizando una Red Bayesiana.

2.2.1 Discretización de variables

A menudo conviene representar un fenómeno continuo en la naturaleza usando variables discretas. Para ello, las medidas continuas tienen que ser discretizadas. Esto puede hacerse proyectando la escala de valores continua en un conjunto finito de intervalos. Los valores que caigan en el mismo rango se considerarán como un mismo estado.

Una vez seleccionadas las variables de estudio en las tareas anteriores es necesario, para el proceso de construcción de los modelos, la discretización de las variables. Normalmente las redes bayesianas consideran variables discretas o nominales, por lo que si no lo son, hay que discretizarlas antes de construir el modelo. Aunque existen modelos de redes bayesianas con variables continuas, éstos están limitados a variables gaussianas y relaciones lineales.

2.2.2 Construcción de los modelos

Después de definir las variables, el siguiente paso en la construcción de un modelo es definir su estructura. Esto se hace conectando variables con arcos (también llamados enlaces). En las redes bayesianas los arcos son dirigidos. Cambiar la dirección de un arco cambia su significado. La ausencia de un arco entre dos variables indica que no existen relaciones de dependencia directa entre ellas, sino a lo sumo a través de otras variables. La presencia de un arco indica una relación de influencia causal entre dos variables.

En esta parte del proyecto, el aprendizaje estructural consiste en encontrar las relaciones de dependencia entre las variables, de forma que se pueda determinar la topología o estructura de la red bayesiana. De acuerdo al tipo de estructura, se aplican diferentes métodos de aprendizaje estructural: aprendizaje de árboles, aprendizaje de poli-árboles, aprendizaje de redes multiconectadas, métodos basados en medidas y búsqueda, métodos basados en relaciones de dependencia.

2.2.3 Clasificación

El último paso en el proceso de modelado es especificar parámetros, basta con proporcionar las probabilidades a priori de los nodos raíz y las probabilidades condicionales del resto de los nodos

En esta fase se aprovechan las características que poseen los métodos bayesianos en tareas de aprendizaje. Cada ejemplo observado va a modificar la probabilidad de que la hipótesis formulada sea correcta (aumentándola o disminuyéndola). Es decir, una hipótesis que no concuerda con un conjunto de ejemplos significativos no es desechada por completo sino que se disminuirá la probabilidad estimada para la hipótesis. Los métodos bayesianos permitirán tener en cuenta en la predicción de la hipótesis el conocimiento a priori o conocimiento del dominio en forma de probabilidades.

3. Resultados obtenidos

Es necesario especificar dos aspectos para describir una Red Bayesiana: topología de grafo (estructura) y los parámetros de cada Distribución Condicional de Probabilidad (CPD). Esto hace posible generar ambos a partir de los datos. Sin embargo, definir la estructura es más difícil que definir los parámetros, siendo la tarea de definición de la red demasiado compleja para los humanos. En este caso la estructura de la red y los parámetros de las distribuciones locales debe ser aprendido de los datos, ya que el aprendizaje automático de la estructura gráfica de una red bayesiana es un reto dentro del aprendizaje de la máquina. Además, cuando algunos de los nodos están ocultos o faltan datos, definirlo es más difícil que definirlo cuando se observa todo.

La Red Bayesiana es desconocida en muchos de los sucesos prácticos y, por tanto, se necesita definir a partir de los datos. Este problema se conoce como problema de definición de una Red Bayesiana. Describiéndolo de una forma informal, sería: obtención de los datos base y priorización de la información (por ejemplo, conocimiento del experto, relación causal); estimación de la topología del grafo (estructura de la red) y distribución de los parámetros JPD (parámetros de probabilidad conjunta) en la Red Bayesiana.

El desarrollo de la estructura de una Red Bayesiana se considera un problema más complejo que la definición de los parámetros de dicha red. Asimismo, existe otro handicap en el caso de situaciones de observación parcial cuando los nodos están ocultos o cuando directamente faltan.

El caso simple es una Red Bayesiana definida y detallada por un experto. Por lo que se usa para desarrollar inferencias. En otras aplicaciones, la tarea de definir la red es demasiado compleja, siendo necesario que la estructura de la red y la distribución local de los parámetros sea desarrollada a partir de datos.

Automáticamente, el desarrollo de la estructura gráfica de una Red Bayesiana es un reto que se persigue dentro del aprendizaje de la máquina.

La red construida es la que se muestra en la Figura 4. Red obtenida a partir del algoritmo K2. Como se aprecia ninguna variable ha quedado descolgada.

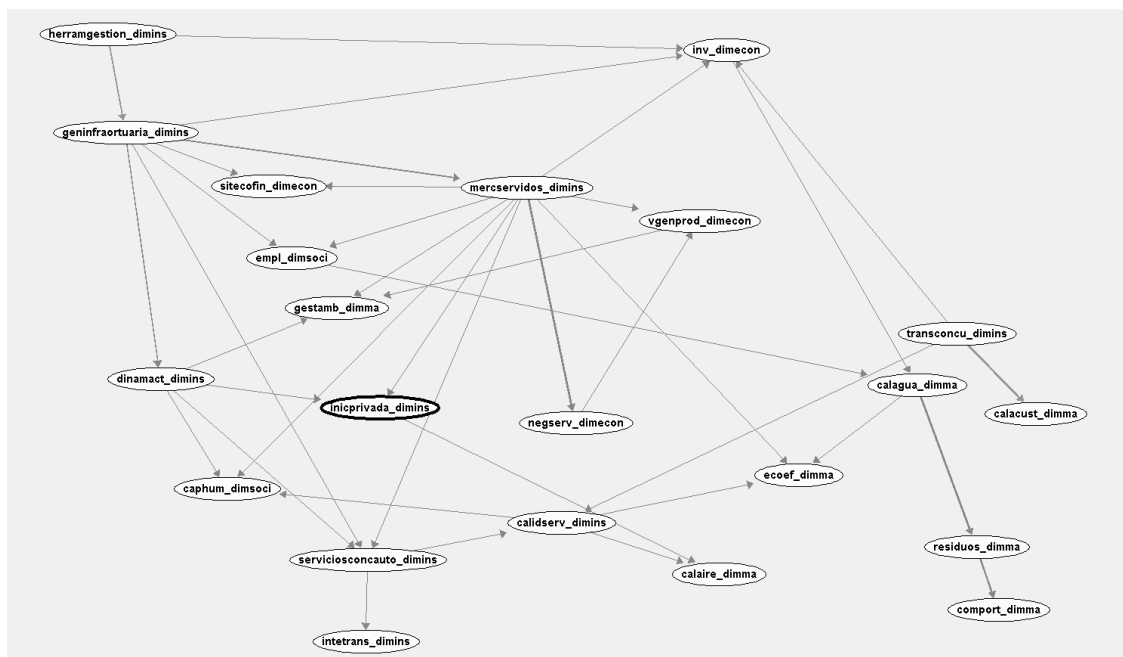


Figura. 4. Red bayesiana obtenida. Algoritmo K2

Los pasos que son necesarios seguir son los siguientes:

- Identificación de los factores relevantes
- Determinación de cómo esos factores están relacionados causalmente entre ellos
- El arco causa-efecto significa que la causa es un factor involucrado en provocar ese efecto

El estudio de la red bayesiana en su conjunto es complejo, por lo que se estudian las relaciones entre las variables de forma más simple aislando “trozos de red”. Así, en la Figura 5 se puede ver una parte de la red en la que se puede analizar las relaciones entre las variables inv_dimecon, geoinfraortuaria_dimins y heramientagestion_dimins, al tratarse de una de las relaciones más significativas. El padre de las variables inv_dimecon y geoinfraortuaria_dimins es heramientagestion_dimins. Se produce una relación divergente, de forma que ambos hijos divergen del padre (heramientagestion_dimins), por lo que en estas

circunstancias se puede decir que si se conoce *herramgestion_dimins*, entonces *inv_dimecon* y *geoinfraortuaria_dimins*, son condicionalmente independientes (Figura 5).

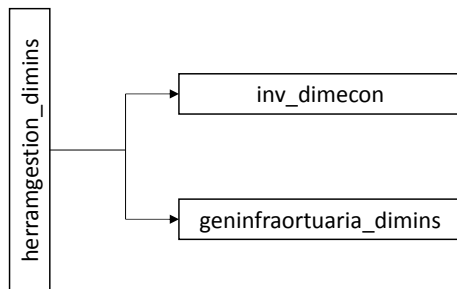


Figura. 5. Relaciones obtenidas. Relación 1

La variable *herramgestion_dimins* es una variable decisora, aparece en la red como una variable “nodo” de la que salen arcos, por lo que se genera una conexión divergente, se tiene un nodo padre que proyecta todos sus arcos hacia varios hijos. O lo que es lo mismo las flechas salen de él y divergen hacia sus hijos. (Figura 5). No olvidar que Herramientas de apoyo a la gestión (ID: *herramgestion_dimins*) se refiere a los sistemas de gestión de apoyo a la toma de decisiones: sistemas de gestión de la calidad, cuadros de mando integral, campañas de caracterización de mercados, etc.

Cuando *mercservidos_dimins* es una variable dato conocida, sus variables hijas *sitecofin_dimecon*, *serviciosconcauto_dimins*, *inicprivada_dimins*, *ecof_dimma*, *vgenprod_dimecon*, *empl-dimsoci*, *inv_dimecon*, *negserv_dimecon*, *gestamb_dimma*, y *caphum_dimensoci* son condicionalmente independientes debido a la conexión divergente que se produce (Figura 6). Si se analiza la conexión en serie entre las variables *geoinfraortuaria_dimins*, *mercservidos_dimins* y todos sus hijos (*sitecofin_dimecon*, *serviciosconcauto_dimins*, *inicprivada_dimins*, *ecof_dimma*, *vgenprod_dimecon*, *empl-dimsoci*, *inv_dimecon*, *negserv_dimecon*, *gestamb_dimma*, y *caphum_dimensoci*) se observa que todos ellos dependen de *geoinfraortuaria_dimins* a través de *mercservidos_dimins* (Figura 6). Esto quiere decir que, debido al grafo casual, la variable *mercservidos_dimins* tiene diez efectos comunes que son sus diez hijos (*sitecofin_dimecon*, *serviciosconcauto_dimins*, *inicprivada_dimins*, *ecof_dimma*, *vgenprod_dimecon*, *empl-dimsoci*, *inv_dimecon*, *negserv_dimecon*, *gestamb_dimma*, y *caphum_dimensoci*).

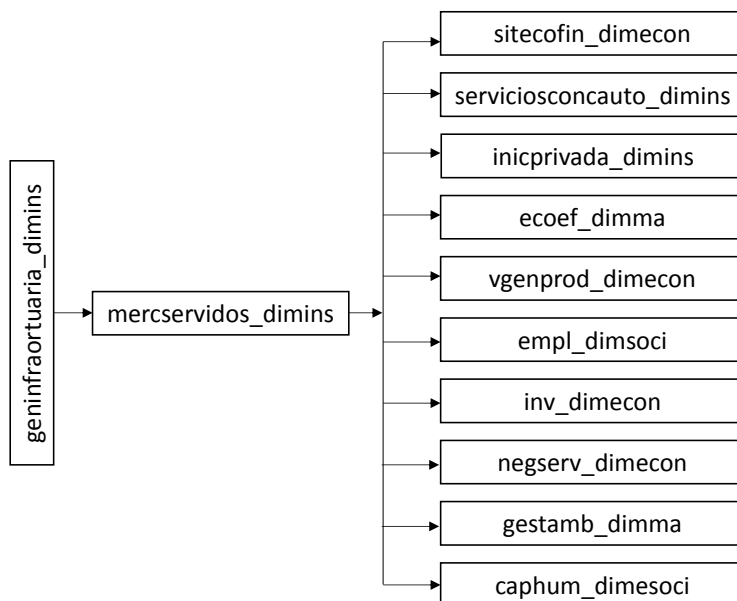


Figura. 6. Relaciones obtenidas. Relación 3

Grafo casual: la variable *mercservidos_dimins* tiene diez efectos comunes: *sitecofin_dimecon*, *serviciosconcauto_dimins*, *inicprivada_dimins*, *ecoef_dimma*, *vgenprod_dimecon*, *empl-dimsoci*, *inv_dimecon*, *negserv_dimecon*, *gestamb_dimma*, and *caphum_dimensoci* (Figura 6).

4. Conclusiones

De la red obtenida mediante al empleo del algoritmo K2 se aprecia que la categoría más decisora en la sostenibilidad: categoría institucional, luego económica y social a la misma altura, y por último la ambiental.

Los sistemas de gestión de apoyo a la toma de decisiones: sistemas de gestión de la calidad, cuadros de mando integral, campañas de caracterización de mercados, etc., representados por *herramgestion_dimins* se representa como una variable padre de la red (solo salen flechas de ese nodo). Lo mismo ocurre con *transconcu_dimins* que representa a las iniciativas dirigidas a garantizar que todo operador que desee prestar servicios en el puerto u optar a una concesión pueda conocer de modo transparente las condiciones para operar en el puerto y los mecanismos administrativos que regulan dicho proceso, que es un padre de la red. La variable *transcocu_dimins* es una variable decisora, aparece en la red como una variable “nodo” de la que salen arcos, por lo que se genera una conexión divergente, se tiene un nodo padre que proyecta todos sus arcos hacia varios hijos. O lo que es lo mismo las flechas salen de él y divergen hacia sus hijos.

Otra variable fundamental en la estructura de la red es *mercservidos_dimins*, de ella salen 10 flechas a 10 nodos diferentes, son los efectos de la estructura y evolución de los principales tráfico de mercancías, estos efectos son tanto sociales, económicos, institucionales y medioambientales; es decir los mercados servidos tienen efectos sobre el tipo, marco de prestación y regulación de los servicios del puerto, sobre el número de empresas que operan en el puerto, dentro de la categoría institucional; en la categoría económica sobre el EBIDTA, EBIDTA/tonelada, inversión pública en relación con el cash-flow y : ingresos por tasas de ocupación y actividad entre otros; sobre la categoría social ejerce un efecto sobre sus dos variables que representan el empleo en la comunidad portuaria, seguridad laboral y formación en servicios y concesiones portuarios, empleo, comunicación interna y participación, formación, estructura de plantilla y equidad, seguridad y salud en el trabajo, entre otros. Para la categoría medioambiental los mercados servidos son la causa de los grados de implantación de los sistemas de gestión ambiental (EMAS, ISO 14001 y PERLS) y recursos económicos invertidos gastos, así como inversiones en su caso, asociados a la implantación, certificación y mantenimiento de un sistema de gestión ambiental y de la eficiencia en el uso del suelo, consumo de agua y energía eléctrica por la Autoridad Portuaria. Por lo tanto los mercados servidos suponen una variable muy importante dentro de la planificación desde una perspectiva sostenible.

Tabla 3 Variables hijos de la variable *mercservidos_dimins*

Variables hijo	Descripción
<i>serviciosconcauto_dimins</i>	Tipos, marco de prestación y regulación
<i>inicprivada_dimins</i>	Número de empresas que operan en el puerto, superficie terrestre ocupada, caracterizada como uso comercial concesionado, etc.
<i>vgenprod_dimecon</i>	Entre otros indicadores: productividad del trabajo según ingresos, productividad del trabajo según EBIDTA, etc.
<i>sitecofin_dimecon</i>	Entre otros indicadores: rentabilidad sobre activos, EBIDTA/tonelada, servicio de la deuda, relación gastos de explotación e ingresos de explotación, etc.
<i>inv_dimecon</i>	Entre otros indicadores: inversión pública en relación con el cash-flow, inversión ajena frente a la inversión pública, renovación de activos
<i>negserv_dimecon</i>	Entre otros indicadores: ingresos por tasas de ocupación y actividad, uso comercial de la superficie, uso de los muelles, etc.
<i>empl_dimsoci</i>	Empleo en la comunidad portuaria, seguridad laboral y formación en servicios y concesiones portuarios, etc.
<i>caphum_dimensoci</i>	Empleo, comunicación interna y participación, formación, estructura de plantilla y equidad, seguridad y salud en el trabajo, etc.
<i>gestamb_dimma</i>	Grados de implantación de los sistemas de gestión ambiental (EMAS, ISO

	14001 y PERLS) y recursos económicos invertidos gastos, así como inversiones en su caso, asociados a la implantación, certificación y mantenimiento de un sistema de gestión ambiental
<i>ecof_dimma</i>	Eficiencia en el uso del suelo, consumo de agua y energía eléctrica por la Autoridad Portuaria
<i>ecof_dimma</i>	Eficiencia en el uso del suelo, consumo de agua y energía eléctrica por la Autoridad Portuaria

Las variables de la categoría dimensión institucional se encuentran muy relacionadas entre sí.

Las económicas fundamentales en términos de causa-efecto, son efecto de las variables de los mercados servidos que es de dimensión institucional. El valor generado y la productividad dependiente de negocio y servicios (ingresos por tasas de ocupación y actividad, uso comercial de la superficie, uso de los muelles, etc.).

Las variables de dimensión sociales son efecto de variables de dimensión institucional pero no tienen una relación directa entre variables de la misma dimensión, la social.

Las variables de categoría ambiental se encuentran muy relacionadas entre ellas en la red bayesiana y son efectos de variables de categoría institucional principalmente. Por ello, aunque las Autoridades Portuarias no tienen competencias ambientales, desempeñan un papel clave en la adecuada gestión ambiental del puerto (ya que actúan como gestores de infraestructura, reguladores, coordinadores de los servicios prestados y, en especial como líderes de la comunidad). La actividad del puerto genera impactos tanto en el medio acuático como en el terrestre y aéreo, y este capítulo evalúa los impactos y las medidas implantadas para reducirlos, dándose información también sobre los sistemas de recepción y gestión de quejas ambientales disponibles en los puertos.

Puertos del Estado no realiza su planificación y gestión portuaria guiándose únicamente por la viabilidad económica de su actividad y la contribución a la organización de una logística eficiente, sino que también queda patente su responsabilidad con la sociedad y el medio ambiente, así como su compromiso con la transparencia; constituyendo esta memoria un claro testimonio de ello.

Las variables de las dimensiones económica, social y ambiental son efecto de variables de dimensión institucional

Resulta clave que las Autoridades Portuarias vayan incorporando a los instrumentos de que disponen para la regulación de los servicios portuarios y la gestión del dominio público, los elementos exigibles en materia de sostenibilidad que la ley de Puertos contempla.

Referencias bibliográficas

1. B. Molina Serrano, N. González Cancelas, F. Soler Flores, Francisco y A. Camarero Orive, Classification and prediction of port variables using Bayesian Networks. *Transport Policy*, 31-jul-2017. DOI information: 10.1016/j.tranpol.2017.07.013
2. O. Doerr, O. Políticas portuarias sostenibles. *Boletín FAL. CEPAL. Edición n° 299, número 7 de 2011*
3. Global Reporting Initiative (2000). Guía para la elaboración de Memorias de Sostenibilidad. Versión 3.1. GRI
4. O. Serrano. Operativa portuaria y sostenibilidad. *CONAMA LOCAL 2015*, 7 octubre de 2015. Málaga
5. R.J. Sánchez, A. Jauimurzone. G. Willmsmeier, G. Pérez Salas, O. Doerr y F. Pinto. Transporte marítimo y Puertos. Desafío y oportunidades en busca de un desarrollo sostenible de América Latina y El Caribe. *CEPAL. Serie Recursos Naturales e Infraestructura*.
6. C. Crespo Soler, V. M. Ripoll Feliu; A. M. Crespo Trujillo, y A. Giner Fillol. La sostenibilidad ambiental en el sistema portuario de titularidad estatal. *XIII Congreso AECA. Armonización y Gobierno de la Diversidad*. 22-24 Septiembre 2005
7. Grupo De Trabajo 23 (2004). La sostenibilidad en los puertos. *CONAMA VII Cumbre del desarrollo sostenible*, 24 de noviembre de 2004

8. N. G. Cancelas, F. S. Flores & A. C. Orive. Modelo de eficiencia de las terminales de contenedores del sistema portuario español. *Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA. Rect@*, Vol. 14; 49-67.
9. C. Crespo Soler, A. Giner Fillol, J. A. Morales Baraza, N. Ponte Tubal, y V. M. Ripoll Feliu. La información de sostenibilidad en el marco de las cuentas anuales: análisis aplicado al caso de la Autoridad Portuaria de Valencia. *Revista do Contabilizado de Maestrado em Ciências Contábeis da UERJ*, Rio Janeiro, v-12, n.3, p-11 set./dez, 2007
10. F. González, A. Guerra, F. Martín, J. J. Nóvoa, C. Otero y j. Penela. Medición de la sostenibilidad en el sistema portuario Español: propuesta metodológica a través de indicadores sintéticos de desarrollo sostenible. *XII Reunión de economía mundial*, mayo de 2010. Santiago de Compostela
11. F. J. Blancas, M. González, F. M. Guerrero y M. Lozano. Indicadores sintéticos de turismo sostenible. Una aplicación para los destinos turísticos de Andalucía *Rect@: Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, ISSN-e 1575-605X, N°. 11, 2010, págs. 85-118
12. Autoridad Portuaria De A Coruña, Autoridad Portuaria De Valencia, Organismo Público Puertos Del Estado (2008). Guía para la elaboración de memorias de sostenibilidad en el sistema portuario español. FEPORTS
13. Puertos Del Estado (2011). Memoria de sostenibilidad del sistema portuario de interés general.
14. N. Friedman & M. Goldszmidt. Building classifiers using bayesian networks. *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*, Menlo Park, Ca: AAAI Press
15. S. Jara-Díaz, E. Martínez-Budría, C. Cortes & A. Vargas. Marginal costs and scale economies in Spanish ports. *25th European Transport Forum, Proceedings Seminar L*, PTRC, London, pp. 137-147.
16. C. Tebaldi & M. West. Bayesian inference on network traffic using link count data. *Journal of the American Statistical Association*, 93(442), 557-573.
17. J. Cain. Planning improvements in natural resource management. guidelines for using bayesian networks to support the planning and management of development programmes in the water sector and beyond. Wallingford, Oxon: CEH Wallingford.
18. C. Conati, A. Gertner y K. Vanlehn. Using bayesian networks to manage uncertainty in student modeling. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 12, 371-417.
19. J. Bromley, N. A. Jackson, O. J. Clymer, A. M. Giacomello & F. V. Jensen. The use of hugin® to develop bayesian networks as an aid to integrated water resource planning* 1. *Environmental Modelling & Software*, 20(2), 231-242.
20. S. Sun, C. Zhang & G. Yu. A bayesian network approach to traffic flow forecasting. *Intelligent Transportation Systems*, IEEE Transactions on, 7(1), 124-132.
21. W. Zheng, D. H. Lee & Q. Shi. Short-term freeway traffic flow prediction: Bayesian combined neural network approach. *Journal of transportation engineering*, 132(2), 114-121.
22. D. Janssens, G. Wets, T. Brijs, K. Vanhoof, T. Arentze & H. Timmermans. Integrating Bayesian networks and decision trees in a sequential rule-based transportation model. *European Journal of operational research*, 175(1), 16-34.
23. E. Castillo, J. M. Menéndez & S. Sánchez-Cambronero. Traffic estimation and optimal counting location without path enumeration using Bayesian networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23(3), 189-207
24. E. Castillo, J. M. Menéndez & S. Sánchez-Cambronero. Predicting traffic flow using Bayesian networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 42, No. 5; 482-509.
25. P. Trucco, E. Cagno, F. Ruggeri & O. Grande. A Bayesian Belief Network modelling of organisational factors in risk analysis: A case study in maritime transportation. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(6), 845-856.
26. E. Klemola, J. Kuronen, J. Kalli, T. Arola, M. Hanninen, A. Lehtikoinen & U. Tapaninen. A cross-disciplinary approach to minimising the risks of maritime transport in the Gulf of Finland. *World Review of Intermodal Transportation Research*, Vol. 2, No. 4, 343-363.
27. P. Kaluza, A. Kölzsch, M. T. Gastner & B. Blasius. The complex network of global cargo ship movements. *Journal of the Royal Society Interface*, rsif20090495
28. A. Hofleitner, R. Herring, P. Abbeel & A. Bayen. Learning the dynamics of arterial traffic from probe data using a dynamic Bayesian network. *Intelligent Transportation Systems*, IEEE Transactions on, 13(4), 1679-1693.
29. A. Camarero, N. González-Cancelas, F. Soler & I. López. Utilización de redes bayesianas como método de caracterización de parámetros físicos de las terminales de contenedores del sistema portuario español. *Revista de Ingeniería*, (39), 31-38.

30. F. S. Flores, N. G. Cancelas, A. C. Orive, J. L. A. Gárate & M. D. C. P. Monzón. Diseño de un modelo de planificación de zonas de actividades logísticas mediante el empleo de redes bayesianas. *Revista Ingeniería Industrial*, 12(1).
31. K. X. Li, J. Yin, H. S. Bang, Z. Yang & J. Wang. Bayesian network with quantitative input for maritime risk analysis. *Transportmetrica A: Transport Science*, 10(2), 89-118.
32. J. H. Zaragoza, L. E. Sucar, E. F. Morales, C. Bielza, & P. Larranaga. Bayesian chain classifiers for multidimensional classification. En *IJCAI*. 2011. p. 2192-2197.
33. J. Pearl. Probabilistic reasoning in intelligent systems: Networks of plausible inference. Morgan Kaufmann. 1988
34. J. L. Almazán-Gárate, M. C. Palomino-Monzón, N. González-Cancelas y F. Soler-Flores. Relationship between air pollution and natural gas with respect to maritime transport. Methodology based on Bayesian Networks. *Global Virtual Conference*. 7-11 April 2014. Transport and Logistics Section.
35. E. Castillo, J. M. Gutiérrez and A.S. Hadi. Expert Systems and Probabilistic Network Models. Springer Verlag, New York. 1997
36. R. O. Duda, P. E. Hart and D. G. Stork. Pattern Classification. Wiley, New York. 2001
37. J. Pearl. The Solution for the Branching Factor of the Alpha-Beta Pruning Algorithm and its Optimality. *Communications of the ACM*. 1982. Vol 25, no.8