

**OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS LOGÍSTICOS DEL SECTOR CARBÓN USANDO  
TÉCNICAS HEURÍSTICAS Y METAHEURÍSTICAS****OPTIMIZATION OF COAL SECTOR LOGISTICS PROCESSES USING  
HEURISTIC AND METAHEURISTIC TECHNIQUES****MSc. L. Jaimes Cerveleón\*, PhD. J. D. Fernandez Ledesma\*****\*Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela de Ingenierías  
Medellín, Antioquia, Colombia.**

E-mail: {Leonor.jaimes, Javier.fernandez}@upb.edu.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5622-9523>Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3744-3791>

**Resumen:** Este artículo presenta los resultados del uso de las herramientas de optimización en los procesos logísticos del transporte en el sector industrial del carbón. Se realizó un análisis de los modelos de optimización heurísticos y meta heurísticos más adecuados para la posible implementación a corto plazo en la solución de un problema logístico en el sector carbón. Por otro lado, se evidenció la importancia que tienen actualmente los procesos logísticos y el cambio que genera la inclusión de procesos de optimización o del uso de herramientas tecnológicas y claramente que deben ser aplicables a los diferentes elementos o necesidades que tenga la industria del sector carbón. Finalmente, se recomienda que se deben identificar las necesidades y así mismo seleccionar las mejores herramientas para contribuir y apoyar los procesos de optimización. De esta manera la inclusión de herramientas de optimización permite obtener resultados potenciales en las industrias relacionados con: costos, aumentar clientes, optimizar materia prima, entre otras.

**Palabras clave:** Heurísticas, Metaheurísticas, Inteligencia Artificial, Industria 4.0, Optimización, logística del transporte.

**Abstract:** This article presents the results of the use of optimisation tools in transport logistics processes in the coal industry. An analysis of the most suitable heuristic and meta-heuristic optimisation models for possible short-term implementation in the solution of a logistics problem in the coal sector was carried out. On the other hand, the current importance of logistic processes and the change generated by the inclusion of optimisation processes or the use of technological tools was clearly shown, which should be applicable to the different elements or needs of the coal industry. Finally, it is recommended to identify the needs and select the best tools to contribute to and support the optimisation processes. In this way, the inclusion of optimisation tools allows to obtain potential results in the industries related to: costs, increase customers, optimise raw materials, among others.

**Keywords:** Heuristics, Metaheuristics, Artificial Intelligence, Industry 4.0, Optimization, Transport logistics.

## 1. INTRODUCCIÓN

La logística es una herramienta muy importante que contribuye y fortalece la creación y la mejora de los mercados en los cuales participan las diferentes industrias. La correcta coordinación de los procesos logísticos hace que se cuente con accesos rápidos y ágiles con todos los actores y elementos que se involucran en la cadena de abastecimiento, los cuales permiten que dichas empresas ejerzan un alto nivel de competitividad en los mercados que impactan. Para lograr todo esto, es importante que en los procesos logísticos se implementen herramientas diferentes que permitan mejorar y optimizar sus desempeños. Las herramientas matemáticas dan soluciones a problemas complejos a través de estrategias para mejorar procesos industriales. Es relevante mencionar que la optimización de los procesos contiene tanto implementación como integración de tecnologías y consolidación con herramientas computacionales y tecnologías como: internet de las cosas, inteligencia artificial, que son parte de la industria 4.0.

En la actualidad, diferentes autores han presentado trabajos relacionados. (Melo *et al.*, 2012), trabajo que permite el uso de una red de cadena de suministros múltiple. (Rivera *et al.*, 2021), trabajo que se enfoca en el uso del recorrido simulado para localización y ruteo. (Abarca *et al.*, 2021), trabajo que muestra la aplicación de industria 4.0, Big Data e internet de las cosas se muestra la importancia de la aplicación de soluciones innovadoras en logística y en la cadena de suministro gracias a la industria 4.0, para la generación de éxito en cuanto a la innovación como valor agregado a sus clientes.

Se mencionan otros trabajos realizados por diversos autores desde el punto de vista de la logística específicamente en el sector carbón. (Uribe *et al.*, 2021), trabajo que muestra una panorámica general del sector carbón con la Universidad Francisco de Paula Santander-Cúcuta, en el cual muestra un análisis muy general de la situación del sector carbón en el departamento. En cuanto a la logística enfatiza en el transporte y comercialización indicando que las principales vías de acceso son trochas por lo cual el pequeño minero prefiere tercerizar este proceso. Adicionalmente establece que existen 5 o 6 patios de acopio propiedad de intermediarios y cooperativas en donde los pequeños mineros llevan el producto para ser comercializado al interior del país principalmente termoelectrónico. El carbón que se dirige al exterior se concentra en 3 centros de acopio propiedad de Colcarbex (cooperativa multiactiva) (Uribe *et al.*, 2021). También resaltan trabajos como el de Hermenegildo Gil Gómez, Martín D. Arango

Serna, y Julián A. Zapata Cortés (Serna *et al.*, 2009), donde reflejan la importancia de la logística esbelta en el transporte en el sector minero aurífero, planteando 4 ítems para su aplicación: flexibilidad, relación con los transportadores, comunicación, optimización de rutas y operaciones. Dentro de esta investigación se plantean métodos como: Método de Ahorros, Método de barrido, Metaheurísticos: Recocido simulado, búsqueda tabú, algoritmos genéticos, colonias de hormigas (Rubio *et al.*, 2022). Por otro lado, otros autores mencionan que la optimización de la logística o de los procesos logísticos (Luis Márquez), busca la optimización de la red de transporte y así consolidar las exportaciones del mineral carbón desde diferentes sitios en Colombia identificando de manera acertada las posibles rutas óptimas del carbón iniciando en los sitios de producción en el país hasta los diferentes puertos marítimos de exportación en Colombia. Así mismo, se estableció una malla de flujo de bajo costo mirando el medio y transporte por carretera, fluvial y ferroviario logrando infraestructuras mejoradas y de opciones múltiples. La optimización usando programación lineal y redes neuronales (Parra *et al.*, 2021). Trabajos (L. Man-zhi, 2009; Y. Xiao y A. Konak, 2016) muestran la importancia en Colombia y en países como EEUU, China, Japón donde son países principales productores de carbón y consumidores y transformadores del mismo, en investigaciones realizadas se ve un modelo de la cadena de suministro del carbón basado en redes múltiples de Petri, buscando optimizar las cadenas, usando recursos y el medio para crear condiciones para el cliente. Por otro lado, es importante resaltar que se utiliza el flujo de capital y el flujo logístico por medio del método simplex de programación lineal y se establece mediante la red de Petri orientada a objetivos desde la perspectiva del flujo de trabajo (L. Man-zhi, 2009; Y. Xiao y A. Konak, 2016; S. Yu, 2011; Goodarzian *et al.*, 2021). Finalmente, este trabajo muestra la utilización de inteligencia artificial para realizar procesos de regresión y predecir la demanda del carbón haciendo uso de industria 4.0 y buscando que la industria del sector vea la necesidad de encontrar alternativas que mejoren sus ventas y la competitividad.

## 2. LOGÍSTICA EN EL PROCESO DEL CARBÓN

Dentro del sector carbón se destacan algunos elementos básicos que integran los procesos de la logística de forma general. Algunos de los que se

pueden destacar son: proveedores de insumos y materia primas, transformación, producto y comercialización. La figura 1, muestra el proceso de producción del carbón:

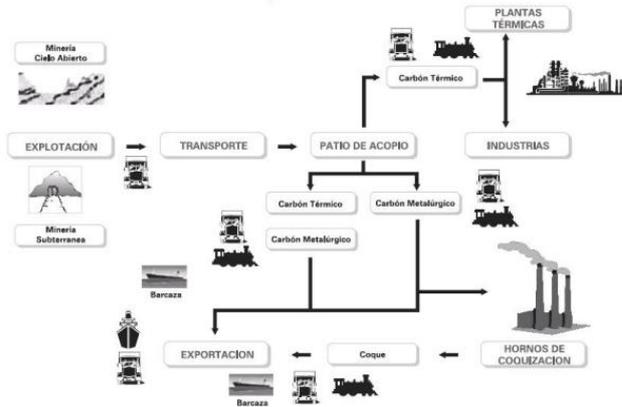


Fig. 1. Proceso de producción del carbón  
Fuente: PEDCTI 2014-2020

## 2.1 Suministro de bienes y servicios

Para que la cadena del carbón pueda operar de manera adecuada es necesario que tenga en cuenta el abastecimiento de diversos insumos o materias primas que permitan llevar a cabo su correcta operación. Algunos de los insumos necesarios son:

- Maquinaria dedicada al proceso de exploración como brocas, georreferenciadores y penetradores. Para la explotación de la mina se debe identificar el tipo de explotación si es a cielo abierto o subterránea. Para el caso Norte de Santander, la explotación es subterránea se requieren volquetas, ventiladores, malacates, minadores, rieles, choches, transportador, taladros neumáticos/hidráulicos, escudos normales o autodesplazantes, rozadoras, tolvas, cepillos, pernos y mallas de sostenimiento (PEDCTI 2014-2020, 2014).
- Para los procesos de beneficio se requieren cintas transportadoras, trituradores, tolvas, molinos, celdas de flotación, cribas, válvulas, ciclones, filtros, bombas, secadores.
- En cuanto al proceso de transformación se requiere una alta inversión por parte del minero, pues dentro de ellos se encuentran equipos de baja tecnología como colectores de humo y limpieza de aire, hornos, secadores, limpieza de aguas, subproductos o desechos, colectores de efluentes, contenedores entre otros. Así mismo, se requieren equipos de alta tecnología como, hornos de plasma, hornos de atmósfera controlada, hornos de arco eléctrico, reactores de alta presión y alta temperatura, equipos de

carbonización, de hilado, entre otros (PEDCTI 2014-2020, 2014).

- Adicionalmente se requieren insumos de la industria plástica para el almacenamiento y empaque de los productos, ductos, tuberías, contenedores son requeridos para procesos de acopio de producto, transporte de producto o agua. De la misma manera, se requieren implementos de seguridad como cascos certificados, guantes específicos para procesos de minería. Para la entibación minera, se requieren insumos de la industria maderera, requeridos también para la elaboración de tablas que ayudan a forrar y sostener la mina, así como para la elaboración de puertas y refuerzos de la misma mina.
- Para el control de calidad del carbón se requieren equipos de laboratorio como medidores de azufre, índices de reactividad y dureza, equipos de caracterización fisicoquímica, térmica, petrográfica, superficial entre otros.
- Se requieren sistemas de iluminación para la mina, alarmas auditivas y lumínicas, sistemas de seguridad, equipos para identificación de caudal de aire y gases, transformadores, controladores, y redes de transferencia de datos (PEDCTI 2014-2020, 2014).
- De la industria química se necesitan reactivos para el proceso como algunos ácidos, diluyentes, estabilizadores, barreras de agua y cal para control de explosivos y algunos reactivos para el tratamiento de aguas.
- Otro de los insumos importantes en el proceso son los explosivos los cuales son suministrados por la industria militar.
- Proveedores de tecnología como software para control de procesos, control de calidad y actividades de comunicación y manejo de información logística como manejo de inventarios. Así mismo, es importante tener en cuenta que se requieren otro tipo de servicios tecnológicamente especializados como servicios de geología, servicios de laboratorio, servicios legales, servicios de gestión ambiental, servicios de instalación y mantenimiento eléctrico y de maquinarias, servicios de contaduría, servicios de establecimiento de huella de carbono entre otros (PEDCTI 2014-2020, 2014).
- Dentro de la operación minera se encuentran los sistemas de carga y transporte del carbón, los cuales identifican la forma se llevará a cabo el proceso traslado del material que ha sido extraído de la mina. En cuanto a la carga generalmente se realiza de forma manual. Si se realiza de manera especializada se hace uso de herramientas o palas que son de bajo perfil. En cuanto al proceso de transporte de

la mina al exterior de la misma, se realiza por medio de bandas transportadoras, coches o locomotoras. Algunas de estos se manipulan manualmente, de forma mecánica o eléctrica (PEDCTI 2014-2020, 2014).

## 2.2 Transporte de la mina

En esta etapa del proceso productivo, el carbón que ha sido extraído de la mina se traslada desde la mina hasta culminar los demás procesos, los cuales pueden ser directamente el envío al consumidor final, la transformación o el beneficio.

Para esta etapa del proceso se debe tener en cuenta la cantidad de carbón a transportar, así como las condiciones de tipo geográfico en las que se encuentre la mina. Algunos de los elementos necesarios para este proceso son los carboconductos, volquetas, bandas transportadoras, retroexcavadoras y cargadores entre otros, los cuales en muchos casos hacen que el proceso no llegue a ser viable pues se debe subcontratar algunos de estos elementos sobre todo el transporte al consumidor final lo cual debido a los costos de fletes influye en el beneficio para el productor (PEDCTI 2014-2020, 2014).

## 2.3 Beneficio del carbón

Esta es una etapa importante dentro del proceso de la cadena de cadena del carbón, ya que permite generar valor agregado al producto por medio de los procesos fisicoquímicos del mismo. De la misma manera, en esta etapa es importante tener en cuenta los residuos generados en este proceso como lo son el tratamiento de aguas contaminadas y los residuos finos que concluyen de este proceso.

## 2.4 Transformación primaria

En esta etapa podemos encontrar una transformación primaria la cual involucra al carbón que sale directamente de la mina o el carbón que pasa por la etapa de beneficio. Estos carbones se someten a procesos termoquímicos los cuales general que el producto que se obtiene tenga un valor agregado aún mayor que el del carbón beneficiado. Dentro de estos procesos de transformación primaria podemos identificar algunos dependiendo de la calidad que se quiera obtener el carbón: coquización, el cual consiste en una carbonización del carbón por calentamiento; la grafitización la cual busca transformar el carbón en grafito sintético por medio de procesos térmicos; Carboquímica el cual es un proceso en el cual se integran reacciones químicas del carbón e hidrógeno para que por medio de estas reacciones se produzcan hidrocarburos de cualquier tipo como colorantes,

aceites, combustibles etc; activación superficial, el cual es un proceso que implica aumentar la capacidad de absorción del carbón aumentando los microporos y finalmente las emulsiones combustibles, las cuales se realizan con carbones de características muy específicas para este proceso mezcladas con agua y un hidrocarburo (PEDCTI 2014-2020, 2014).

## 2.5 Transformación secundaria

Esta etapa busca brindar productos de mayor valor agregado al llevar a cabo procesos de transformación de los productos obtenidos en la transformación primaria, los cuales requieren de la utilización de equipos altamente especializados y un estricto control del proceso. Ejemplo de estos productos son la producción de fibras de carbón por medio de la destilación de alquitranes, producción de nanotubos/fullerenos de carbón, producción de grafeno, entre otros.

## 2.6 Comercialización

Para este eslabón de la cadena del carbón, se identifican modos de transporte en los cuales se lleva el producto al cliente final. Dentro de los principales se encuentra el transporte terrestre, el cual se da en la superficie terrestre; el fluvial, que se encarga de llevar personas o productos por medio de ríos de gran profundidad; el transporte marítimo, el cual traslada mercancía o personas a través del mar por medio de buques de gran capacidad y finalmente el ferrocarril, que es un medio de transporte terrestre el cual esta direccionado sobre un carril (PEDCTI 2014-2020, 2014).

Así mismo, existen otros actores que intervienen en el proceso de comercialización como es el caso de los Intermediarios en el mercado nacional, quienes se encargan de encontrar clientes o sirven de canal de distribución al llevar a cabo el proceso de venta del producto obteniendo por ello una utilidad. También se encuentran las ventas directas en las cuales existe un canal de distribución al por menor, facilitando el contacto directo entre el cliente final y los vendedores independientes (PEDCTI 2014-2020, 2014). Para el proceso de exportación se encuentra Broker, el cual hace el papel de intermediario en los mercados internacionales y sirve de puente entre el vendedor y comprador obteniendo un beneficio económico por dicha intermediación. De la misma manera, encontramos a Trader, quien se encarga de gestionar y garantizar las operaciones de tipo jurídicas en los procesos de compraventa de ciertos productos en mercados externo. Otro elemento importante dentro de los actores que intervienen en el proceso de

comercialización, son los Consumidores finales, pues son las que llegarán a utilizar el producto. Es importante hacer claridad en que el cliente y el consumidor tienen definiciones diferentes, pues el cliente puede adquirir el producto, pero no necesariamente llegar a consumirlo. Para este caso en particular cuando se hace referencia al consumidor final se habla de las industrias que generan energía y vapor (PEDCTI 2014-2020, 2014).

En cuanto a los clientes se refiere, se puede decir que la mayor parte del carbón metalúrgico o coque y térmico y de excelente calidad se va a los mercados internacionales por lo cual existen relaciones mutuamente beneficiosas con clientes internacionales. En cuanto a los procesos logísticos para el traslado del producto a puertos nacionales o al Golfo de Maracaibo se ha visto afectada por los problemas de tipo político que se están viviendo en la actualidad entre Colombia y Venezuela, ya que el carbón que se consume en el ámbito nacional se consume localmente, pues los precios de los fletes son elevados para poder llevarlo a otras industrias ubicadas en el país, donde se requiere este producto.

De acuerdo con los escenarios planteados anteriormente, el vínculo más importante en el proceso de comercialización se da entre el pequeño minero y el comercializador quien cuenta con centros de acopio del producto el cual se encuentra integrado por producto proveniente de minas tradicionales y de pequeña escala (Sánchez, 2021).

### 3. HERRAMIENTAS MATEMÁTICAS

#### 3.1 Heurísticas

En los métodos heurísticos, se identifican situaciones complejas con el fin de solucionar problemas en diferentes campos del conocimiento. Esto es debido, a que se pueden calcular o encontrar soluciones que permitan declararse como soluciones óptimas o soluciones con el mínimo porcentaje de error (Goodarzian *et al.*, 2021).

Los métodos matemáticos heurísticos se clasifican en (Goodarzian *et al.*, 2021):

- Métodos de orden de descomposición
- Métodos de orden inductivos
- Métodos de orden de reducción
- Métodos de orden constructivos
- Métodos de orden para la búsqueda local.

Estas herramientas matemáticas logran dar solución a problemas reales, complejos y que son útiles en el ámbito industrial (X.-C. Dong y G.-X. Wang, 2012).

#### 4.1. Metaheurísticas

Los métodos metaheurísticos, permiten establecer estrategias de mejora para aquellos problemas en los cuales la solución óptima no es fácil de encontrar. Por ellos involucra la integración de conceptos desde diferentes campos del conocimiento como por ejemplo la Inteligencia artificial, La genética, la biología, las matemáticas, entre algunas otras (Ficarella *et al.*, 2021).

Los métodos matemáticos metaheurísticos se pueden clasificar en (Ficarella *et al.*, 2021):

- Metaheurísticas inspiradas en la física.
- Metaheurísticas inspiradas en la evolución.
- Metaheurísticas inspiradas en la biología.

### 5. INDUSTRIA 4.0

La industria 4.0 es un término que agrupa un conjunto de técnicas que permiten dar solución a diferentes aplicaciones y adicionalmente permite a las industrias optimizar procesos.

Algunas de las técnicas para la aplicación de la industria 4.0 son (Sánchez, 2021):

- Análisis de volumen de datos - Big Data
- El uso de internet de las Cosas
- Computación bajo la nube
- Software para Simulación
- Máquinas de aprendizaje
- Realidad virtual y aumentada
- Fabricación efectiva
- Seguridad de los datos
- Robótica

### 6. RESULTADOS PRELIMINARES

Dentro de los principales resultados obtenidos hasta el momento, se destaca la aplicación de un diagnóstico que permitió evidenciar el estado actual en el cual se encuentran algunas minas de carbón. Para ellos se tomaron 95 minas de carbón las cuales se encuentran ubicadas en el Departamento Norte de Santander.

Este diagnóstico se aplicó con el fin de determinar como se encontraban las empresas en procesos como: innovación, investigación y desarrollo, propiedad intelectual, co-creación con clientes y proveedores, entre otros aspectos importantes para el análisis.

CONTRATACIÓN DE SERVICIOS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO				
Por favor para las siguientes preguntas marque la casilla correspondiente a la escala: Siempre (S); A menudo (AM); Algunas Veces (AV); Nunca (N), según su apreciación en cada pregunta.				
	S	AM	AV	N
23) Nuestra estrategia de desarrollo producto/servicio se fundamenta en el desarrollo de proyectos de I+D en colaboración con otras organizaciones.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
24) La empresa ha contratado con servicios de entidades externas (Institutos tecnológicos, Universidades, Proempresas y otros), para el desarrollo de productos (bienes y servicios) con un valor agregado para el uso y/o explotación al interior de la organización.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25) La empresa ha contratado con servicios de entidades externas (Institutos tecnológicos, Universidades, Proempresas y otros), con el propósito de acceder a convocatorias de tipo público o privado en innovación	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fig. 2. Instrumento de diagnóstico  
Fuente: propia

La figura 2, muestra el instrumento utilizado para realizar el diagnóstico, el cual estaba integrado por 54 preguntas las cuales fueron analizadas mediante herramientas de estadística descriptiva como las medidas de tendencia central, las cuales permiten dar un posicionamiento de un dato característico en relación a un conjunto de datos. Esto permite dar una idea amplia del estado de las empresas con respecto a algunos de los aspectos mencionados anteriormente.

**VARIABLES DE ENTRADA**

- ✓ País (1. países bajos 2. Estados Unidos 3. Islas Malvinas 4. Israel 5. Turquía 6. Dinamarca)
- ✓ Años (2007-2016)
- ✓ Producción (Toneladas/año)
- ✓ Precio internacional del carbón (Dólar/tonelada)
- ✓ Precio internacional del petróleo (Dólar/Barril WTI)
- ✓ Número de clientes (Unidades)
- ✓ Costo de transporte (FOB Dólares/Tonelada para cada tipo de carbón)
- ✓ Tipo de carbón (1=Antracita. 2=Hulla térmica. 3=Coque y semicoke. 4= Metalúrgico)

**VARIABLE DE SALIDA**

Demanda en miles de toneladas/año



P=[2 10 44.628,65 82,42 53,95 3 194,84 49,71 122,47 66,44 3 7.254,87]

Fig. 3. Variables utilizadas para entrenar la red neuronal  
Fuente: propia

```

%% RED NEURONAL PERCEPTRON MULTICAPA
d=load ('DATOS BIEN.txt');
d1=load ('PREDICCION BIEN.txt');
q=d(1:2:60,1:11);
q1=d1(1:2:60);
net = feedforwardnet([11 5 2], 'trainbr');%trainlm,trainbr,trainscg
% train net
net.trainParam.epochs = 500;
net.trainParam.show = 1;
net.trainParam.goal = 0.5;
net.divideParam.trainRatio = 0.4;
net.divideParam.valRatio = 0.1; %
net.divideParam.testRatio = 0; %
% train a neural network
[net,tr,Y,E] = train(net,d',d1');
view(net)

```

Fig. 4. Algoritmo utilizado Red perceptrón multicapa  
Fuente: propia

```

%%
%%validacion
valida = net(d');
figure,plot(d1), hold on
plot(valida, 'r')
%%
qa=d(2:2:60,1:11);
q1a=d1(2:2:60);
valida1 = net(qa');

```

Fig. 5. Validación de la red neuronal  
Fuente: propia

Las figuras 4 y 5 muestran el algoritmo utilizado para predecir la demanda de carbón utilizando las variables de entrada de la figura 3.

En la figura 6 se observa la dispersión que presentan los datos de las empresas con respecto a la media del conjunto de datos o empresas analizadas. Un 14,15% de estas presentan una varianza con valores entre 0,7 y 0,9 lo cual demuestra que la desviación existente es poca, indicando que las empresas son similares en cuanto a la aplicación de prácticas de innovación abierta.

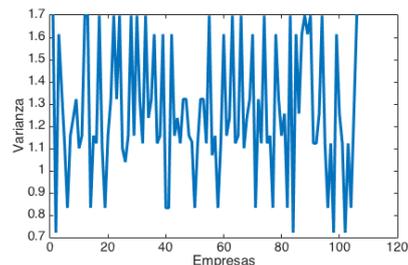


Fig. 6. Cálculo de Varianzas  
Fuente: propia

Finalmente, la figura 7 muestra los resultados obtenidos en el proceso de aplicación de la red neuronal utilizando regresión lineal. Nótese, que la predicción se encuentra en un rango permisible y que el entrenamiento y la validación de la red fueron correctos.

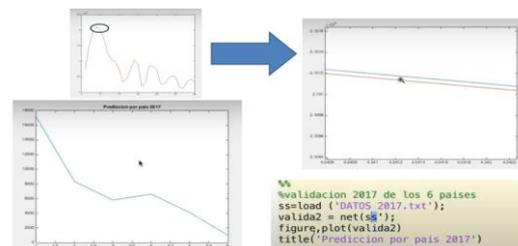


Fig. 7. Gráfica de resultados de regresión  
Fuente: propia

## 7. CONCLUSIONES

La industria 4.0 es un conjunto de herramientas que permiten dependiendo de la necesidad, dar solución rápida y precisa a diferentes aplicaciones. En este trabajo se demostró que es posible predecir la demanda de carbón utilizando inteligencia artificial.

El porcentaje de error obtenido en la regresión fue de 3.5%. esto indica que un 96,5% sea el porcentaje de efectividad. Por otro lado, el instrumento aplicado fue fundamental para caracterizar cada una de las empresas y medir el nivel de utilización de herramientas con la industria 4.0. Finalmente, se evidenció que existen brechas grandes en relación a la adopción, adaptación y utilización de las herramientas matemáticas que permiten mejorar los procesos de innovación logística. Reto en el cual se deben plantear diferentes estrategias que faciliten el uso tanto de herramientas heurísticas como metaheurísticas y la solución real de necesidades en la industria.

## REFERENCIAS

- Abarca, J. D. C. P., Bahena, B. M., & Urbano, J. E. (2021). *Industria 4.0. Inventio. La génesis de la cultura universitaria en Morelos*.
- Arango Serna, M. D., Gil Gomez, H., & Zapata Cortés, J. A. (2009). *Logística esbelta aplicada al transporte en el sector minero. Boletín de Ciencias de la Tierra*, (25), 121-136.
- Ficarella, E., Lamberti, L., & Degertekin, S. O. (2021). Comparison of three novel hybrid metaheuristic algorithms for structural optimization problems. *Computers & Structures*, 244, 106395.
- Goodarzian, F., Kumar, V., & Abraham, A. (2021). Hybrid meta-heuristic algorithms for a supply chain network considering different carbon emission regulations using big data characteristics. *Soft Computing*, 25(11), 7527-7557.
- Goodarzian, F., Wamba, S. F., Mathiyazhagan, K., & Taghipour, A. (2021). A new bi-objective green medicine supply chain network design under fuzzy environment: Hybridmetaheuristic algorithms. *Computers & Industrial Engineering*, 160, 107535.
- L. Man-zhi, Z. Mei-hua, L. Xue-qing, and Y. Jixian. (2009). The research on modeling of coal supply chain based on objectoriented Petri net and optimization, *Procedia Earth Planet. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 1608–1616.
- M. T. Melo, S. Nickel, and F. Saldanha-da-Gama. (2012). A tabu search heuristic for redesigning a multi-echelon supply chain network over a planning horizon, *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 136, no. 1, pp. 218–230.
- Parra, P. Y., Arond, E., Strambo, C., & Araújo, J. V. (2021). El ocaso del carbón y la necesidad de una transición justa en Colombia.
- Plan Estratégico Departamental de Ciencia Tecnología e Innovación PEDCTI 2014-2020. (2014). pp. 434–440.
- Rivera, F. C., Hermosilla, P., Delgadillo, J., & Echeverría, D. (2021). Propuesta de construcción de competencias de innovación en la formación de ingenieros en el contexto de la industria 4.0 y los objetivos de desarrollo sostenible (ODS). *Formación universitaria*, 14(2), 75-84.2.
- Rubio, L. R., Mas, F., Martín-Mariscal, A., & Álvarez, E. P. (2021). Carbon footprint management in the aerospace industry: circular economy and plm environment in industry 4.0 contexts. *sinergias en la investigación en stem*, 63.9.
- S. Yu, C. Ding, and K. Zhu. (2011). A hybrid GA-TS algorithm for open vehicle routing optimization of coal mines material, *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, no. 8, pp. 10568–10573.
- Sánchez Martínez, L. (2021). *La Industria 4.0 y la transformación digital*.
- Uribe-Vélez, J., Avila-Roa, L., & Chacón-Ramírez, E. A. (2021). Sistema de gestión de energía bajo el paradigma de Industria 4.0. *Revista Ingenio*, 18(1), 33-40.
- X.-C. Dong and G.-X. Wang. (2012). Coal Logistics Competency Strategies for Ports in the Tianjin and Hebei Regions around the Bohai Bay in China, *Energy Procedia*, vol. 17, pp. 436–443.
- Y. Xiao and A. Konak. (2016). A genetic algorithm with exact dynamic programming for the green vehicle routing & scheduling problem, *J. Clean. Prod.*, pp. 1–14, 2016.