

ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LA TORRE EIFFEL

Nicolás Pardo Alvarez¹

1: GIPIMME, GIMACYR, Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

1: PVG + Arquitectos, PVG Arquitectos S.A.S, Medellín, Colombia.

E-mail: nicolas.pardo.alvarez@gmail.com

RESUMEN

La preocupación por el constante incremento de emisiones de gases de efecto invernadero se hace cada vez más notoria, en particular por su estrecha relación con el aumento de la temperatura global. Teniendo en cuenta que el aumento de la temperatura global se ha hecho relevante desde el inicio de su registro histórico y se asocia a diferentes actividades humanas, surge una serie de preguntas acerca del impacto ambiental asociado a algunas estructuras históricas vigentes hasta la fecha, como la Torre Eiffel. En este artículo se llevó a cabo una estimación de la huella de carbono de la Torre Eiffel, analizando su ciclo de vida y excluyendo la deconstrucción y el reciclaje de la estructura. Para esto se utilizó el software UMBERTO NXT CO2 y se encontró que la etapa de extracción y manufactura de materiales y la etapa de operación y/o mantenimiento de la torre son las de mayor generación de emisiones, siendo el mantenimiento la de mayor impacto, ya que es una estructura con gran flujo de comercio que continuará vigente muchos años.

Palabras clave: Huella de carbono, emisiones de gases de efecto invernadero, Torre Eiffel.

ESTIMATION OF THE CARBON FOOTPRINT OF THE EIFFEL TOWER

ABSTRACT

Concern over the constant increase in greenhouse gas emissions is becoming more and more noticeable, in particular because of its close relationship with the increase in global temperature. Taking into account that the increase in global temperature has become outstanding since the beginning of historic records and is associated with different human activities, a series of questions emerge about the environmental impact associated with some historic structures, such as the Eiffel Tower. In this paper, we made an estimation of the carbon footprint of the Eiffel Tower, analyzing its life cycle with the UMBERTO NXT CO2 software, without considering deconstruction and recycling activities of the structure. We found that most of the emissions came from the extraction/manufacturing of materials and operation/maintenance stages, being the operation the one that contributes the most, given the large impact of tourism and commerce that will continue in the forthcoming years.

Keywords: Carbon footprint, greenhouse gas emissions, Eiffel Tower.

1. INTRODUCCIÓN

Existe una creciente preocupación por la amenaza ambiental, social y económica que representa el calentamiento global asociado al paulatino incremento de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera del planeta. El Sexto Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), publicado en 2016 muestra que hay

un incremento en la temperatura global desde que se registra en 1850. La mayor parte del calentamiento global que ha tenido lugar desde que se tiene registro ha sido muy probablemente debido a actividades humanas, entre las que destacan la utilización de combustibles fósiles, la agricultura, los cambios de ocupación del suelo, la deforestación y el ciclo de vida constructivo de las edificaciones [1–3].

Con respecto a este último factor, en el VI Congreso Internacional del Acero celebrado en la ciudad de Bogotá, Colombia, surgió la inquietud sobre la estimación del impacto ambiental de grandes estructuras metálicas de carácter histórico en la emisión de GEI. Para la correcta cuantificación de GEI nace el concepto de huella de carbono, la cual mide la cantidad de toneladas de CO₂ equivalente asociadas a una actividad o proceso. Entre los protocolos validados a nivel internacional para el cálculo de la huella de carbono se encuentran el PAS 2060 y el GHG Protocol. Estos protocolos, para el caso de edificaciones o estructuras, consideran los procesos de extracción y fabricación de los materiales, el transporte hasta el lugar de construcción, la construcción, la operación y la disposición final de la estructura. Teniendo en cuenta las fases anteriores, algunas estructuras construidas a lo largo de la historia, como la Torre Eiffel, siguen teniendo un impacto ambiental asociado a la operación, el mantenimiento y la disposición final estimada [4–6].

El presente artículo tiene como finalidad estimar la huella de carbono para el caso específico de la Torre Eiffel, partiendo de factores de emisión actuales y haciendo las suposiciones de las etapas analizadas a partir de la información disponible actual y de la época de su construcción, tomada principalmente de la Sociedad para la administración de la Torre Eiffel (Société d'exploitation de la Tour Eiffel). La Torre Eiffel es una estructura de hierro pudelado, con aproximadamente 18.000 piezas de este metal, diseñada por los ingenieros Maurice Koechlin, Émile Nouguier, Gustave Eiffel y sus colaboradores, en conmemoración del primer centenario de la Revolución Francesa, construida para la Exposición Universal de 1889 en París. Se encuentra ubicada al lado del parque del Campo de Marte, a orillas del río Sena. Tiene una altura total de 324 metros (300 metros de la estructura y 24 metros más de las antenas que se han agregado hasta la fecha) y tiene forma piramidal con lados ligeramente curvados. Sin duda, puede considerarse como el elemento arquitectónico más importante de Francia [7–10].

2. APROXIMACIONES PARA EL CÁLCULO

Para el cálculo de las emisiones se utilizó el software Umberto NXT CO₂ a través del *GHG Protocol Product Carbon Footprint*. Las etapas analizadas corresponden a la extracción y manufactura de materiales de la torre, el transporte de los materiales hasta el sitio de su emplazamiento, la construcción, la operación y el mantenimiento hasta la actualidad [5]. Las emisiones correspondientes a la deconstrucción de la torre y la disposición final no harán parte de este estudio, ya que no se tiene un tiempo estimado de vida de la torre, ni lugares de disposición o aprovechamiento de los residuos estimados. Así mismo no se incluyen las modificaciones y mejoras realizadas, debido a que no se cuenta con información de los tipos y cantidades de materiales utilizados.

Las etapas de extracción y manufactura de materiales, transporte y construcción se llevaron a cabo entre los años 1887 y 1889. Para la etapa de extracción y manufactura del hierro y otros materiales, el marco cuenta con 8050 toneladas de hierro pudelado y se tienen cuatro pilares (cimentaciones), de 6 m de ancho y 15 m de largo, donde cada pilar está compuesto por cuatro baterías soportantes. Los pilares se montaron sobre en una capa de concreto vertido en reposo con 2 metros de espesor, cuya base es una capa de arena y grava a una profundidad de 7 metros. El concreto se supuso con un diseño de mezcla característico de la época, en el que el cemento se encuentra al 35% en peso. Se utilizaron los factores de emisión de extracción y manufactura

del acero y de los materiales del diseño de mezcla presentados en las bases de datos de Ecoinvent para Francia. En la Figura 1 se muestra un foto histórica del marco de la Torre Eiffel y en la Figura 2 se presenta un esquema de las cimentaciones para los cuatro pilares soportantes de la estructura [6,8,11].

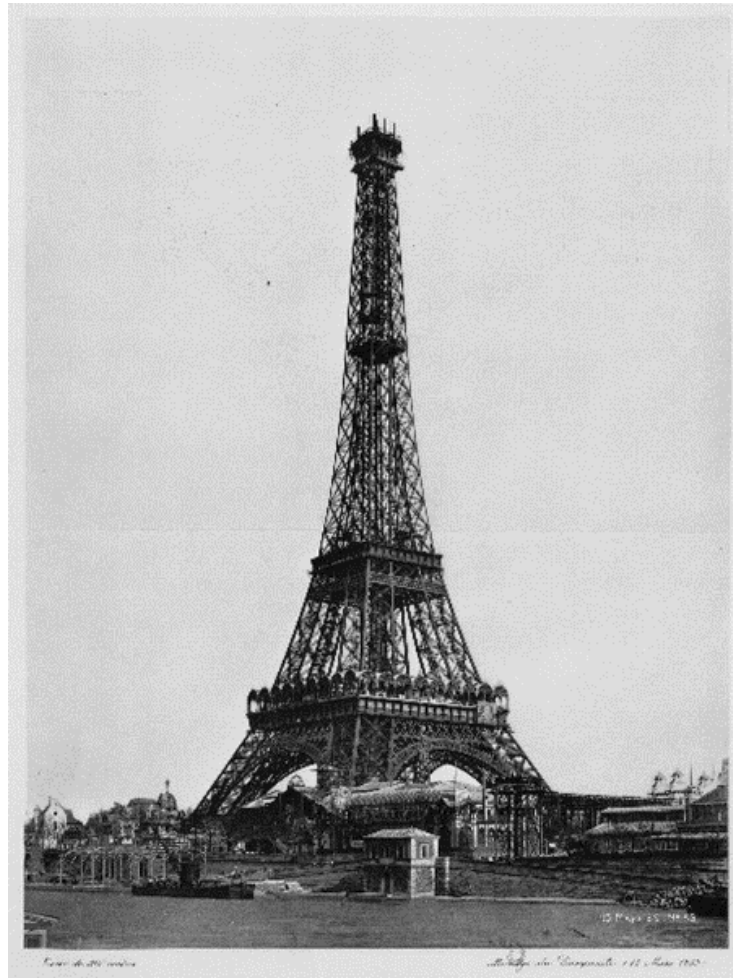


Figura 1. Foto histórica de la Torre Eiffel [12].

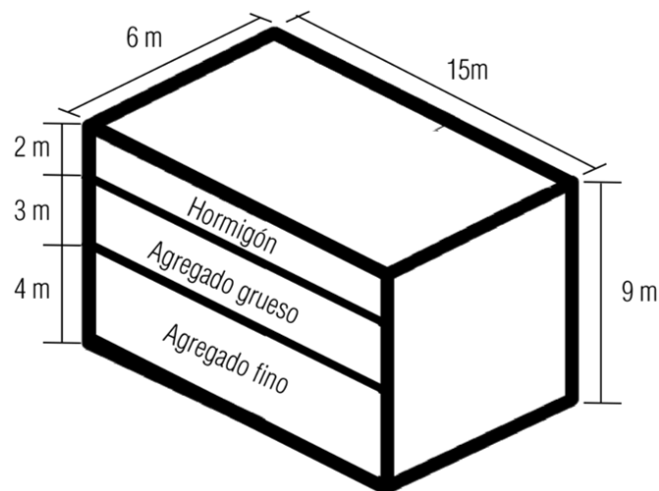


Figura 2. Esquema de las dimensiones de las cimentaciones para los pilares de la Torre Eiffel.

El transporte de hierro y otros materiales a la torre se llevó a cabo desde la fábrica de Levallois-Perret cerca de París, sede de la empresa Eiffel. Se presume que los materiales fueron transportados en barco a vapor río arriba, debido a la ubicación de la empresa y la tecnología disponible en la época. Debido a que no es posible establecer un factor de emisión para el transporte en barco a vapor, se trabajó con el factor de emisión para transporte marítimo de Ecoinvent. En la Figura 3 se presenta la imagen de las localizaciones de la fábrica de Levallois-Perret y la Torre Eiffel y el recorrido asumido a través del río Sena, de color azul en la imagen [6,8,11,13].



Figura 3. Ruta a través del Río Sena desde la fábrica de Levallois-Perret hasta la Torre Eiffel.

Para la fase constructiva, los cortes realizados en el terreno fueron ejecutados con picos y el material fue transportado por carros tirados por caballos y maquinaria a vapor (Figura 4a). Los pilares (4 pilares) fueron montados sobre una capa de concreto vertido en reposo con 2 metros de espesor, cuya base era una capa de arena y grava a una profundidad de 7 metros. El método de vaciamiento por cajones de aire comprimido consistía en la instalación de encamisados de hierro de 6 metros de ancho y 15 metros de largo, que sirvieron para la ejecución en dos etapas. La primera consistió en verter concreto dentro del encamisado, alcanzando un espesor de 2 metros y asegurando el funcionamiento del sistema de vaciado (Figura 4b). En la segunda etapa, la estructura de la torre se montó con ayuda de andamios de madera y pequeñas grúas a vapor fijadas a la misma torre y las piezas se izaron con ayuda de grúas a vapor que subían por la torre (Figura 4c). Todas las piezas metálicas de la estructura fueron unidas con remaches, método constructivo característico de la época (Figura 4d) [6,8,11]. Debido a la falta de información, algunos puntos importantes para las fases de extracción y manufactura, transporte y construcción de la torre (por ejemplo, el uso de cinco ascensores hidráulicos, manipulados mediante bombas hidráulicas y el montaje y modificaciones de los restaurantes del primer piso) no fueron tenidos en cuenta para el cálculo de las emisiones.

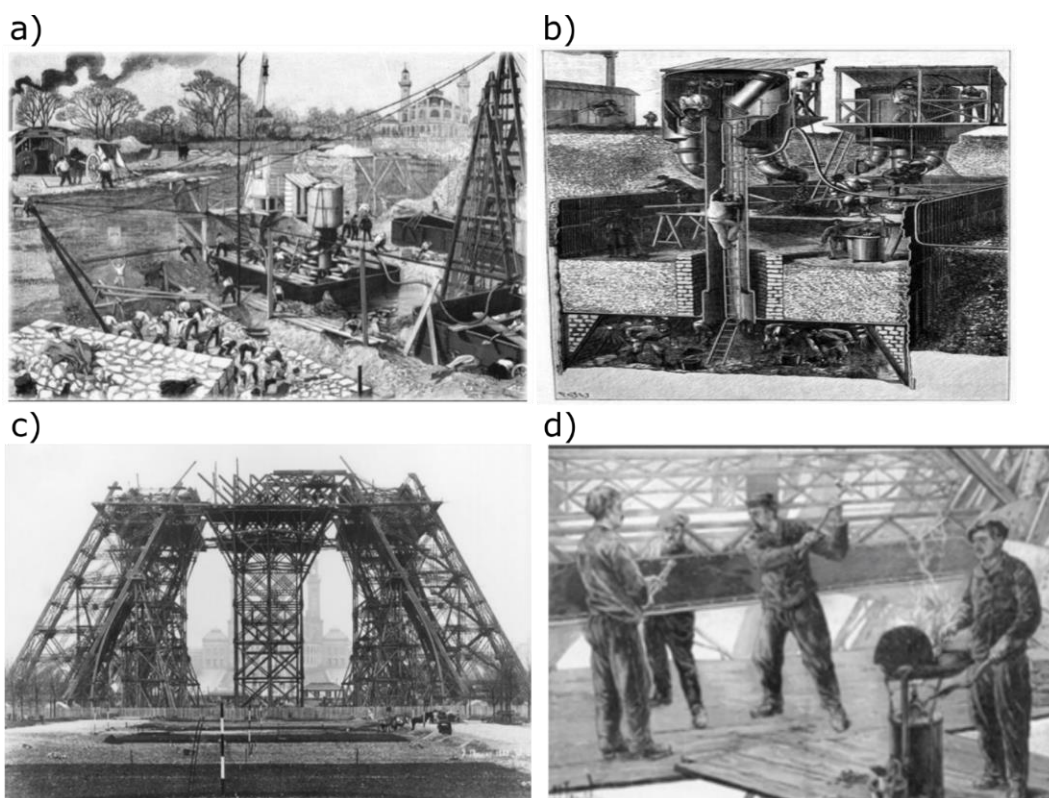


Figura 4. Ilustraciones de la época durante la etapa constructiva. a) Adecuación del terreno mediante picos y palas, b) Método de vaciamiento de concreto por cajones de aire comprimido, c) Montaje de la estructura y d) Colocación manual de remaches [8,11,12].

Después de la inauguración de la torre en 1889, se han realizado diversas modificaciones y mejoras [6,8,11]. Estas emisiones, correspondientes a la fase de operación, se listan a continuación en orden cronológico:

- Las primeras iluminaciones consistían en quemadores a gas instalados en globos de vidrio y un gran proyector eléctrico que emitía un haz de luz azul, blanca y roja orientada hacia los monumentos de París.
- Los ascensores iniciales funcionaban mediante bombas hidráulicas. Sin embargo, se han cambiado algunos de los ascensores hidráulicos por eléctricos a lo largo del ciclo de vida de la torre.
- En el año 1900 las iluminaciones iniciales fueron modificadas por iluminaciones completamente eléctricas.
- En el año 1937 se reconstruyen sólo dos de los cuatro restaurantes iniciales y se instalan treinta proyectores para iluminar el monumento.
- En el año 1958 se modificó la iluminación de la torre, con 1.290 proyectores, que absorbían gran parte de su energía eléctrica de los pozos ubicados alrededor del monumento.
- En el año 1981 la estructura inicial fue modificada, eliminando muchas vigas y se reemplazaron los dos restaurantes del año 1937 por tres restaurantes nuevos.
- En el año 1985 se instalaron 336 proyectores de sodio, posteriormente reemplazados debido a la fatiga en el año 2004 (se conserva hoy en día).
- En el año 1996 se creó una cervecería en reemplazo de dos de los restaurantes reconstruidos en el año 1981.
- En el año 2011 se renovó por completo el primer piso, con la gran novedad del piso de vidrio.

La Sociedad para la administración de la Torre Eiffel reportó para el año 2011 que el consumo eléctrico anual de la torre fue de 6,7 GWh, los cuales incluyen 580.000 kWh para todas sus luces y 705.000 kWh de calefacción y aire acondicionado. Además, para el mismo año, la torre presentó un requerimiento anual de 60.000 m³ de agua potable. Por otra parte, durante el mantenimiento de la torre se consumen 60 ton de pintura anticorrosiva cada 7 años aplicadas manualmente (Figuras 5a y 5b) [14–17].

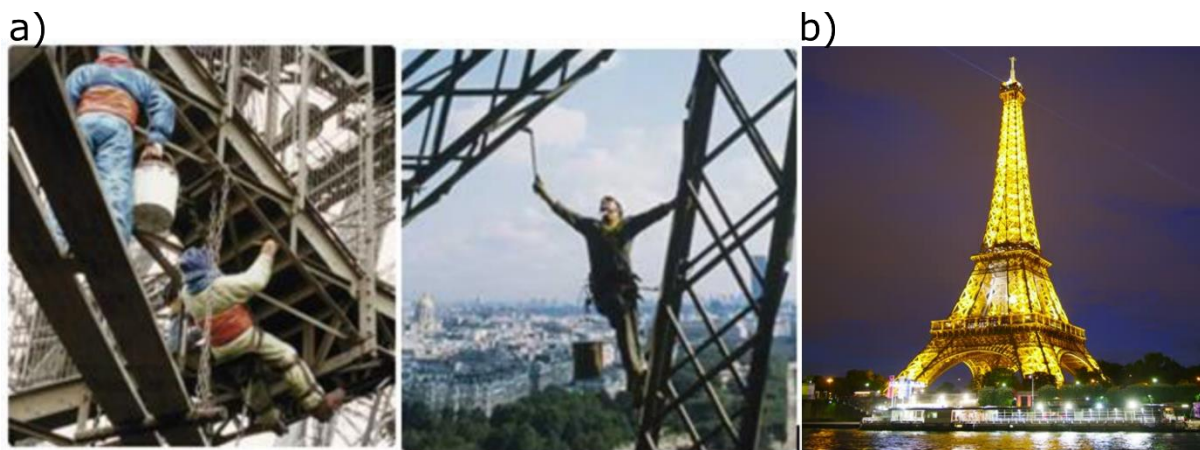


Figura 5. Imágenes características de la fase de operación y mantenimiento. a) Aplicación manual de la pintura anticorrosiva y b) Iluminación de la Torre Eiffel [8,11].

El año 2015 ha sido el más importante en términos de sostenibilidad de la torre. En este año se instalaron dos aerogeneradores de eje vertical, con una capacidad de producción de 10.000 kWh al año y algunas turbinas impulsadas por agua, que se integraron en la red de suministro de agua del primer piso para generar 4.000 kWh al año. Por otra parte, uno de los pabellones fue equipado con cuatro paneles solares, los cuales proporcionan aproximadamente el 50% del agua caliente utilizada en el monumento, principalmente en los restaurantes y baños del primer piso. Además, se hicieron modificaciones para permitir la recuperación de aguas lluvia para su uso en los baños y vidrios de aislamiento térmico en los pabellones, lo que le ha permitido reducir su consumo energético en un 25% [14–17].

En este año también se dio un hito importante para la torre. A partir del 1 de enero de 2015 y durante dos años, la Torre Eiffel cambió de la proveedora alemana E.ON al proveedor de electricidad francés Gaz Electricité de Grenoble (GEG). Esta nueva empresa genera su electricidad a partir de energías renovables, por lo cual la torre obtuvo un periodo sin emisiones de dióxido de carbono asociadas a su consumo eléctrico [17].

3. CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO

Para llevar a cabo el cálculo fue necesario aproximar las cantidades de los materiales de los pilares, ya que se conoce que fueron aproximadamente 8.050 toneladas de hierro pudelado utilizadas para el marco. En la Tabla 1 se presenta la cantidad de material utilizado por los cuatro pilares de soporte de la Torre Eiffel. Las cantidades se aproximaron a 180 m³ para la capa de concreto de dos metros, 270 m³ de agregado grueso para la capa de cuatro metros y 360 m³ de agregado fino para la capa de tres metros.

Tabla 1. Cantidad de material total para los cuatro pilares de soporte de la estructura.

Material	Cantidad total de los cuatro pilares (ton)
Agua	120,00
Cemento	793,80
Concreto (capa de 2 m)	
Agregado fino	520,00
Agregado grueso	399,60
Agregado fino (capa de 4 m)	3.744,00
Agregado grueso (capa de 3 m)	2.916,00

En la Figura 6 se muestra el diagrama Sankey para la huella de carbono, con un valor total de 277.973,74 ton CO₂ eq para consumos aproximados de: materiales de 17.503,4 ton, eléctrico de 433,28 GWh y de agua potable de 3.483.000 m³ hasta el 2017. Un resultado interesante es que desde el inicio de su construcción en el año 1887 hasta la fecha del cálculo actual han transcurrido 130 años, por lo cual la huella de carbono también puede ser expresada con un valor promedio de 2.138,26 ton CO₂ eq/año. En la Figura 7 se presenta la huella de carbono total y la huella de carbono promedio anual para la torre.

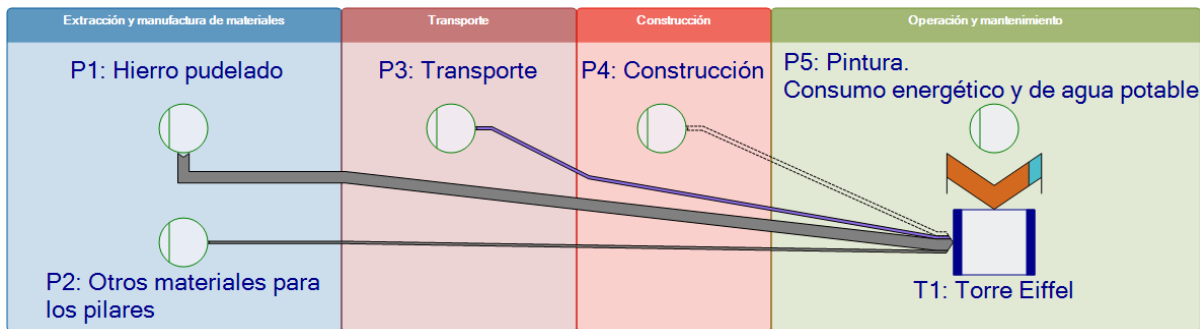


Figura 6. Diagrama Sankey de la huella de carbono de la Torre Eiffel.

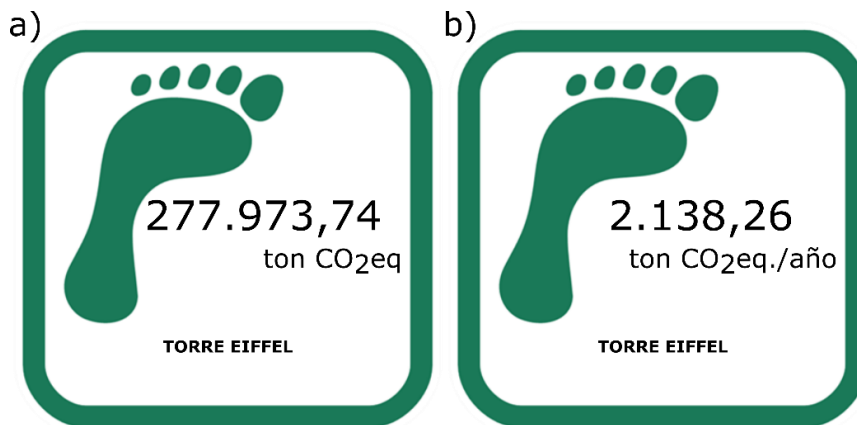


Figura 7. Huella de carbono para la Torre Eiffel hasta el año 2017. a) Huella de carbono total y b) Huella de carbono anual.

En la Tabla 2 se muestra la cantidad, en ton CO₂ equivalente, para cada una de las etapas de la huella de carbono de la Torre Eiffel. La etapa de extracción y fabricación de materiales generó el 10% del total de las emisiones. Por otra parte, la etapa de operación y/o mantenimiento generó 90% del total de las emisiones. Esta etapa en particular continuará aumentando las emisiones,

ya que la huella de carbono fue calculada hasta el año 2017, pues no se tiene un tiempo de finalización de la vida útil de la estructura. Se aclara que las emisiones correspondientes a los ciclos de vida o factores de emisión individuales asociados a algunos de los componentes de la torre no fueron tenidos en cuenta para el cálculo, ya que la información no se encuentra pública.

Tabla 2. Toneladas de CO₂ equivalente y porcentajes de emisiones por etapa de la huella de carbono de la Torre Eiffel.

Fase	Cantidad	Unidad	Porcentaje
Extracción y manufactura de materiales	27.918,63	ton CO ₂ -eq.	10,04%
Transporte	1.19	ton CO ₂ -eq.	0.00%
Operación y mantenimiento	250.053,92	ton CO ₂ -eq.	89,96%
Total	277.973,74	ton CO ₂ -eq.	

Un análisis más detallado de la influencia de las medidas de reducción de la huella de carbono de la torre tomadas a partir de 2015 fue llevado a cabo. Se tomó como inicio para el cálculo el año 2011, en el cual se inició la última campaña de pintado de la estructura (la siguiente iniciará en octubre del año 2018) y para el cual se pudieron obtener registros oficiales de consumo de agua y energía. En la Figura 8 se observa que las emisiones asociadas al consumo de agua se mantienen casi constantes, ya que de 2011 a 2017 el consumo de agua de la torre ha aumentado de 60.000 a 65.000 m³ con un factor de emisión que no ha variado considerablemente su valor. De manera puntual el consumo de agua aumentó, sin embargo, desde el año 2015 con la recuperación de aguas lluvia para su uso en baños, las emisiones no han variado de manera significativa. De igual manera sucede con la pintura, ya que las 60 toneladas de pintura se distribuyeron de manera equitativa para el cálculo con el mismo factor de emisión cada año, por lo cual no se observan diferencias año a año. Caso contrario ocurre con las emisiones asociadas al consumo energético de la torre, ya que desde el año 2011 al año 2017, el consumo energético de la torre ha aumentado de 6,7 a 7,8 GWh.

Durante los años 2011 a 2014 la Torre Eiffel recibía su electricidad de la empresa alemana E.ON. Este hecho, sumado a que la matriz energética alemana presenta grandes variaciones en su reporte anual de factor de emisión (planteando como ejemplos los años 2011 y 2013, con factores de emisión de 0,618 y 0,658 kg CO₂ eq/kWh respectivamente [18,19]), demostraba la necesidad de cambiar a un proveedor energético más limpio. Una vez que la empresa francesa GEG de Grenoble asumió proveer a la torre durante los años 2015 y 2016, se observa en la Figura 8 que las emisiones asociadas al consumo energético desaparecieron, ya que el monumento fue abastecido con un 100 % de energía renovable, que en teoría no genera emisiones de dióxido de carbono (en la revisión bibliográfica realizada no se encontraron reportes del factor de emisión de GEG).

Para el año 2017 no se encontraron registros oficiales acerca del proveedor energético, por lo cual el factor de emisión se asumió de acuerdo a la matriz energética francesa general. Debido a lo anterior, se observa una gran disminución respecto al periodo 2011-2014 y un ligero incremento en las emisiones respecto a 2015-2016. La disminución se atribuye principalmente a que la matriz energética francesa presenta una energía mucho más limpia que la alemana, con un factor de emisión para 2016 de 0,053 kg CO₂ eq/kWh. Esto sumado a que las modificaciones tecnológicas y sostenibles generan un ahorro neto cercano a los 1,94 GWh (energía autogenerada por la torre), demuestran que la torre se mueve hacia una sostenibilidad importante.

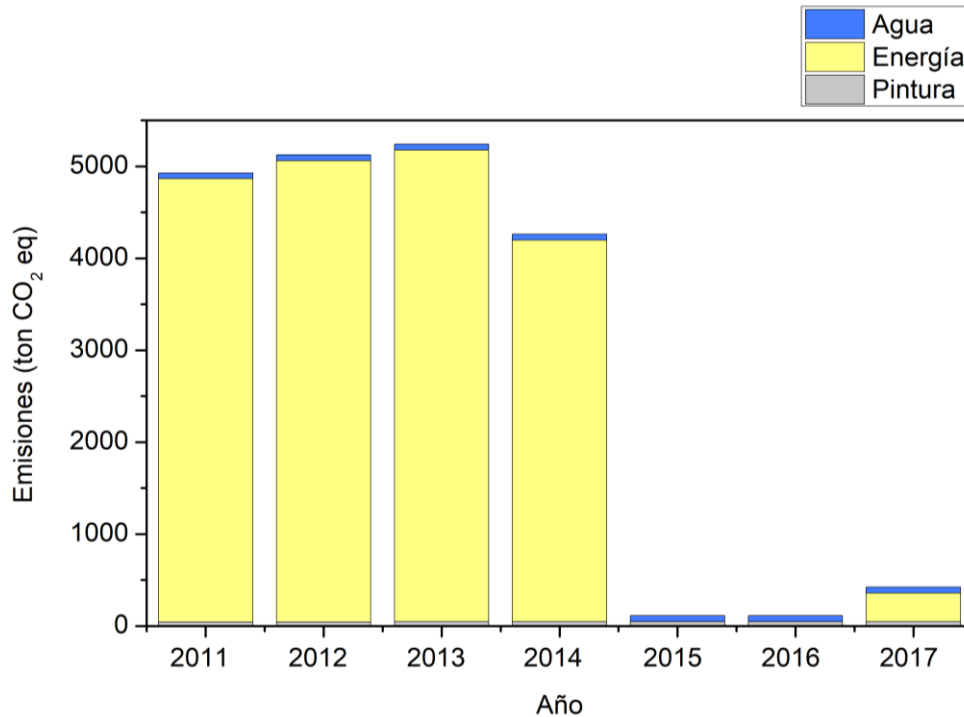


Figura 8. Emisiones por año relacionadas al consumo de agua, energía y pintura para la Torre Eiffel para el periodo 2011-2017.

4. CONCLUSIONES

A partir de los cálculos realizados, se observó que la fase de operación y mantenimiento es la de mayor generación de emisiones, las cuales continuarán en aumento durante el tiempo de vida de la torre. La implicación de conocer el impacto ambiental de esta fase, permite reflexionar acerca de cómo reducir la huella de carbono y qué acciones se pueden poner en marcha. Una muestra de cómo reducir el impacto negativo, son las iniciativas de la Sociedad para la administración de la Torre Eiffel, quienes apuestan al desarrollo sostenible de la torre durante su operación, con la instalación de aerogeneradores, paneles solares, sistemas de recuperación de aguas pluviales y bombas de calor. Además, la decisión de cambiar a un nuevo proveedor energético demostró una gran disminución en las emisiones, debido a que la empresa GEG de Grenoble abasteció el monumento con 100% de energía renovable. Lo anterior permite observar que estructuras de este tipo pueden apostar por el desarrollo sostenible, disminuyendo paulatinamente su impacto ambiental.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a Julio Eduardo Cañón Barriga, Ph.D. en Hidrología y Profesor Asociado de la Universidad de Antioquia, por su acompañamiento y sugerencias durante todo el proceso de investigación y redacción del artículo.

6. REFERENCIAS

- [1] Huovila, P., Alla-Juusela, M., Melchert, L., *et al.*, *Buildings And Climate Change: Status, Challenges And Opportunities*, Sustainable Consumption and Production Branch, Paris, France, 2007.
- [2] UNEP, SBCI, *Assessment Of Policy Instruments For Reducing Greenhouse Gas Emmissions From Buildings*, United Nation Enviroment Programme and Central European University, Paris, France, 2007.
- [3] UNEP, SBCI, *Buildings And Climate Change: Summary For Decision Makers*, United

- Nation Environment Programme and Central European University, Paris, France, 2009.
- [4] Eusko Jaurlaritza, G. V., *Análisis De Ciclo De Vida Y Huella De Carbono*, IHOBE, 1st ed., Bilbao, España, 2009.
- [5] WBCSD, WRI, “Quantifying the greenhouse gas emissions of products: pas 2050 and the ghg protocol product standard: a short guide to their purpose, similarities and differences,” pp. 1–4, 2011.
- [6] Ecoinvent, *Bases De Datos Versión 3.01*, Zurich, Switzerland, 2013.
- [7] MONUMENTS DU MONDE - LA TOUR EIFFEL, 2018, [Online], Available: <https://www.merveilles-du-monde.com/Tour-Eiffel/>, [Accessed: 01-May-2018].
- [8] Flores, J., *TORRE EIFFEL , PARÍS Estructura Y Métodos De Construcción*, 2014.
- [9] Nous, E. Q. U. E., Apprendre, A., “Le tour eiffel.”
- [10] Leiby, K., SECRETS OF THE EIFFEL TOWER, 2011, [Online], Available: <http://www.yalescientific.org/2011/05/secrets-of-the-eiffel-tower/>, [Accessed: 18-Dec-2017].
- [11] Sociedad para la administración de la Torre Eiffel, LA TOUR EIFFEL, 2015, [Online], Available: <http://www.toureiffel.paris/es/todo-saber-sobre-la-torre-eiffel/archivos-tematicos/69.html>, [Accessed: 18-Dec-2017].
- [12] Juan, 20 FOTOGRAFÍAS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA TORRE EIFFEL, [Online], Available: <http://www.oldskull.net/2013/11/20-fotos-de-la-construccion-de-la-torre-eiffel/>, [Accessed: 18-Dec-2017].
- [13] PVG Arquitectos, *Elaboración Propia*, Medellín, Colombia, 2017.
- [14] The Telegraph, EIFFEL TOWER GOES GREEN, 2012, [Online], Available: <https://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/europe/france/9444530/Eiffel-Tower-goes-green.html>, [Accessed: 29-Jun-2018].
- [15] Eseficiencia.es, LA TORRE EIFFEL SE RENUEVA PARA SER ICONO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA, 2016, [Online], Available: <https://www.eseficiencia.es/2016/09/21/la-torre-eiffel-se-renueva-para-ser-icno-de-eficiencia-energetica>, [Accessed: 29-Jun-2018].
- [16] Clean Technica, EIFFEL TOWER NOW GREENER THAN EVER, 2014, [Online], Available: <https://cleantechnica.com/2014/10/13/eiffel-tower-now-greener-ever/>, [Accessed: 29-Jun-2018].
- [17] El Periódico de la energía, LA TORRE EIFFEL SE APUNTA A LAS ENERGÍAS RENOVABLES, 2014, [Online], Available: <https://elperiodicodelaenergia.com/la-torre-eiffel-se-apunta-a-las-energia-renovables/>, [Accessed: 29-Jun-2018].
- [18] Koffi, B., Cerutti, A., Duerr, M., *et al.*, *CoM Default Emission Factors For The Member States Of The European Union Dataset*, Version 2017, European Commission, 2017.
- [19] AGEb, “Energy consumption in germany in 2015”, *Arbeitsgemeinschaft Energ. Bilanzen E. V.*, 2016.