



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

DESARROLLO DE MÓDULOS EN PYTHON PARA EL ANÁLISIS DE CARGAS VEHICULARES POR MÉTODOS DE LA UNAM, AASHTO Y ESPECTROS DE CARGA, CONFORME A LA NOM-012-SCT-2-2017

Fernando Trejo¹, Carlos Chávez²

¹ Grupo Xicuco, Mixquiahuala, México, 2023174g@umich.mx

² Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, Morelia, México, cachavez@umich.mx

Resumen

Debido a las crecientes demandas de sostenibilidad en la industria del asfalto, este artículo aborda la necesidad del análisis de las cargas que afectan el pavimento mediante herramientas de programación en Python. Se destaca la importancia de este análisis para obtener las secciones de pavimento adecuadas. Además, se exploran diferentes metodologías, incluyendo los ejes equivalentes de la UNAM y AASHTO, así como los espectros de carga.

El análisis detallado de las cargas vehiculares, considerando las sobrecargas y adaptándose a las normativas actuales, emerge como una piedra angular en la planificación de vialidades sostenibles y resiliente. En el caso específico de los métodos de la UNAM y AASHTO, se realiza con respecto a la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal. La integración de métodos como los ejes equivalentes de la UNAM y AASHTO, junto con los espectros de carga, proporciona una comprensión más completa de las demandas de tráfico y carga que enfrentan los pavimentos.

El empleo de módulos creados en Python para el análisis del tránsito vehicular y cargas simplifica la obtención e interpretación de datos. Con solo importar el módulo y proporcionar los datos requeridos, es posible obtener los ejes equivalentes y espectros de carga.

El presente artículo aborda el desarrollo de dichos módulos en Python, proporcionando una visión integral sobre las metodologías empleadas y su aplicación práctica en el análisis de cargas vehiculares.

Palabras Clave: Ejes equivalentes, Espectros de carga, Python, Módulo.

1 Introducción

En la actualidad, uno de los desafíos más grandes en la industria del asfalto es la implementación de estrategias que sean sostenibles y amigables con el medio ambiente, razón de ser de este seminario. Diversas técnicas han sido propuestas, tales como el uso de pavimento asfáltico recuperado (RAP) en nuevas mezclas asfálticas, así como la modificación de mezclas asfálticas mediante la incorporación de hule molido proveniente de neumáticos fuera de uso. Sin embargo, para que estas alternativas sean viables y sostenibles, deben demostrar un menor impacto ambiental en comparación con las opciones convencionales, y, además, es imprescindible evaluar su vida útil con relación a las mezclas asfálticas tradicionales.

La comparación de la vida útil de un pavimento se realiza a través de un análisis detallado de la vida a fatiga de cada alternativa, que da como resultado cuantos ejes puede soportar ese pavimento. Aunque, antes de llevar a cabo este análisis, es fundamental evaluar las cargas vehiculares a las que el pavimento estará sometido. Este proceso se puede llevar a cabo mediante la determinación de ejes equivalentes, utilizando métodos establecidos como los propuestos por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO), o bien, a través del análisis de espectros de carga.

La tecnología juega un papel crucial en la optimización y automatización de estos métodos de evaluación. En este contexto, el desarrollo de módulos en Python emerge como una herramienta poderosa para el análisis de cargas vehiculares. Estos módulos permiten una implementación tanto precisa como eficiente de los métodos de la UNAM, la AASHTO, y los espectros de carga.

Todos los módulos presentados en este artículo son componentes del programa Pav Analyzer, diseñado para el análisis integral de pavimentos.

2 Módulo para obtener los ejes equivalentes por el método de la UNAM

2.1 Descripción del método de la UNAM

Uno de los métodos más utilizados en México para el análisis del tránsito es el desarrollado por la UNAM. El cual partió de datos experimentales en tramos de prueba, en carreteras en servicio, de investigación teórica y de experimentación en laboratorio en la pista circular de pruebas, que influyó en sucesivos perfeccionamientos [1].

Para calcular el tránsito de proyecto por el método de la UNAM se tienen que calcular dos tipos de daño: el daño superficial (daño por fatiga por debajo de la carpeta asfáltica) y daño profundo (deformación permanente por encima de la subrasante) se calcula de la siguiente manera [2]:

$$\Sigma L = (TDPA)(C_D)(C_T) \sum_{i=1}^p C_i (W_i \Sigma d_m + (1 + W_i) \Sigma d_v) \quad (1)$$

Donde TDPA es el tránsito diario promedio anual, C_D es la proporción del número de vehículos en el carril de proyecto (distribución direccional), C_T es el coeficiente de acumulación de tránsito en el periodo n de años de diseño, C_i es la proporción de cada tipo de vehículo (i) de la composición del tránsito, d_m es coeficiente de daño del vehículo tipo i cargado, d_v es el coeficiente de daño del vehículo tipo i vacío y W_i es la proporción de vehículos cargados por cada tipo de vehículo.

$$C_T = \left[\frac{(1+r)^n - 1}{r} \right] 365 \quad (2)$$

Donde C_T es el coeficiente de acumulación del tránsito, n son los años de servicio, r es la tasa de crecimiento anual.

El tránsito se estandariza en un eje sencillo dual de 8.2 ton y 5.8 kg/cm². Por ende cada tipo de ejes que circule por el pavimento provocará un daño al pavimento en función del eje estándar. Para calcular el coeficiente de daño primero se tiene que calcular el esfuerzo debido a una carga circular a una profundidad z como se muestra ecuación 3, donde q es la carga distribuida debido al eje en kg/cm², z es la profundidad dada en cm y a es el radio del eje también dada en cm. Para un eje equivalente se tienen datos de entrada como la carga circular q igual a 5.8 kg/cm² y un radio a de 15 cm, la ecuación 3 se simplifica a la ecuación 4.

Para calcular el daño se deberá de hacer conforme a la ecuación 5 en donde $\sigma_z(i)$ es el esfuerzo debido a la carga circular del eje (i) al cual se quiera calcular el daño en kg/cm², σ_{zn} es el esfuerzo debido al eje equivalente en kg/cm². Que se puede calcular con la ecuación 4 y d_i es el daño provocado por el eje (i).

Cuando la profundidad a la que se va a calcular el daño es menor a 30 cm los arreglos tándem y tridem se considerarán compuestos por dos ejes y tres ejes duales independientes, y el daño se considerará como la sumatoria de estos conjuntos. A partir de 30 cm tendrá que ser considerado como el conjunto del arreglo como se muestra en las ecuaciones 6, 7 y 8 calculando el radio a según estas ecuaciones donde P es el peso en toneladas, q es la carga distribuida en kg/cm².



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

$$\sigma_z(i) = q \left(1 - \frac{z^3}{(a_i^2 + z^2)^{3/2}} \right) \quad (3)$$

$$\sigma_{zn} = 5.8 \left(1 - \frac{z^3}{(15^2 + z^2)^{3/2}} \right) \quad (4)$$

$$\log(di) = \frac{\log\sigma_z(i) - \log\sigma_{zn}}{\log 1.5} \quad (5)$$

$$a_i(\text{dual}) = \sqrt{\frac{1000P}{2\pi q}} \quad (6)$$

$$a_i(\text{tamdem}) = \sqrt{\frac{1111P}{4\pi q}} \quad (7)$$

$$a_i(\text{tridem}) = \sqrt{\frac{1333P}{6\pi q}} \quad (8)$$

2.2 Módulo para calcular ejes equivalentes por el método de la UNAM

Para calcular los ejes equivalentes, se puede utilizar el programa DISPAV. Este programa permite calcular los ejes equivalentes basándose en los pesos establecidos por el decreto de enero de 1997 y la norma NOM-012-SCT-2008. Además, DISPAV ofrece la capacidad de realizar estos cálculos a profundidades predefinidas: 5 cm, 15 cm, 30 cm, 60 cm, 90 cm y 120 cm. Sin embargo, no incorpora las actualizaciones de pesos y vehículos de la norma NOM-012-SCT-2-2017.

Por otro lado, el módulo desarrollado en Python incluye estas actualizaciones y permite calcular los ejes a cualquier profundidad, no solo a las predefinidas. Esta flexibilidad y la actualización de datos proporcionan mayor precisión en los cálculos. Además, dado que las sobrecargas con las que circulan los vehículos son una de las principales causas de deterioro de los pavimentos, este módulo permite agregar una sobrecarga a los vehículos en forma de porcentaje, ofreciendo así una herramienta más completa y precisa para el análisis.

2.3 Utilización del módulo

Python ha ganado mucha popularidad por varias razones. En primer lugar, es un lenguaje de programación de código abierto, lo que significa que es gratuito para todos los usuarios. Esto democratiza el acceso a herramientas de programación avanzadas, permitiendo a estudiantes, investigadores y desarrolladores de todo el mundo utilizar y contribuir al lenguaje sin barreras financieras.

Uno de los aspectos más innovadores de Python es la posibilidad de compartir y utilizar módulos a través de PyPI (Python Package Index). PyPI es un repositorio en línea donde los desarrolladores pueden publicar sus módulos y librerías. Esto permite a cualquier usuario de Python buscar, descargar e instalar estos módulos de manera sencilla utilizando herramientas como pip. La accesibilidad a PyPI fomenta la



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

reutilización de código y acelera el desarrollo de proyectos, ya que los desarrolladores pueden aprovechar soluciones ya existentes en lugar de reinventar la rueda.

2.3.1 Descarga del módulo

La instalación del módulo es un proceso sencillo que puede realizarse desde varias interfaces comunes de desarrollo en Python. A continuación, se explica cómo hacerlo:

1. Desde la línea de comandos (cmd):
`pip install ejes_UNAM`
2. Desde la terminal del editor de código:
Si está utilizando un editor de código como Visual Studio Code, PyCharm o cualquier otro que tenga una terminal integrada, abra la terminal.
Escriba el siguiente comando y presione Enter:
`pip install ejes_UNAM`
3. Desde los cuadernos Jupyter:
Si está utilizando Jupyter Notebook o JupyterLab, puede instalar el módulo directamente desde una celda de código. Escriba y ejecute el siguiente comando en una celda:
`%pip install ejes_UNAM`

Después de instalar el módulo, para empezar a usarlo debe importarlo en su script o cuaderno de Jupyter. Escribiendo el siguiente comando en su archivo de Python o en una celda de Jupyter:
`import ejes_UNAM`

2.3.2 Ejemplo de uso

Una vez dentro del editor, tras la importación del módulo “ejes_UNAM” se deberá de llenar los valores de la Tabla 1, utilizando la abreviación de las variables. Posteriormente, se deberán asignar el porcentaje de participación de cada vehículo en el TDPA, colocando cero en vehículos que no participen, como se muestra en la Tabla 2.

Posteriormente se deberá de llamar a la clase “Transito” y a la clase “Ejes_equivalentes_UNAM” para que arroje el resultado del cálculo como se observa en la Imagen 1.

Se realizará un ejemplo con los siguientes datos:

Tabla 1. Descripción del tránsito

Característica de Transito	Abreviación en el código	Valor
Transito Diario Promedio Anual	TDPA	500
Años de servicio	n	9
Tasa de crecimiento anual (%)	r	2.5
Factor direccional	FD	1
Factor de utilización de carril	FC	0.5
Porcentaje de vehículos cargados (%)	C	70
Profundidad a la que se quiere calcular los EE (cm)	z	10
Tipo de camino	camino	A
Porcentaje de sobrecarga (%)	sobrecarga	20



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Tabla 2. Porcentaje de vehículos que componen el TDPA

Tipo de vehículo	Porcentaje
A2	33.9
B2	9.7
B3	0
B3p	0
B4	0
C2	27.4
C3	7.2
C3p	0
C2R2	0
C2R3	0
C3R2	0
C3R3	0
T2S1	2.5
T2S2	4.9
T2S3	0
T3S1	0
T3S2	0
T3S3	0
T2S1R2	5.7
T2S1R3	0
T2S2R2	0
T3S1R2	2.4
T3S1R3	0
T3S2R2	3.9
T3S2R3	0
T3S2R4	0
T2S2S2	0
T3S2S2	0
T3S3S2	2.4



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

```
T3S2S2 = 0
T3S3S2 = 2.4

TDPA = 500 #Tansito diario promedio anual|
n = 9 #Años de servicio
r = 2.5 #Tasa de crecimiento anual (%)
FD = 1 #Factor direccional
FC = 0.5 #Factor de utilización de carril
C = 70 #Porcentaje de vehículos cargados
z = 10 #Profundidad a la que se quieren calcular los ejes equivalentes
camino = "A" #Tipo de camino (Puede ser "A", "B", "C" o "D")
sobrecarga = 20 #En caso de considerar que los vehículos llevan sobrecarga, darla en % (0 si no llevan sobrecarga)

Transito(A2,B2,B3,B3p,B4,C2,C3,C3p,C2R2,C2R3,C3R2,C3R3,T2S1,T2S2,T2S3,T3S1,T3S2,T3S3,T2S1R2,T2S1R3,T2S2R2,T3S1R2,T3S1R3,
T3S2R2,T3S2R3,T3S2R4,T2S2S2,T3S2S2,T3S3S2)
Ejes_equivalentes_UNAM(TDPA, n, r, FD, FC, C, z, camino, sobrecarga);
```

PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS COMMENTS Code

Los ejes equivalentes a 10 cm de profundidad por el metodo de la UNAM son de: 1,877,523

[Done] exited with code=0 in 0.664 seconds

Figura 1. Calculo de ejes equivalentes desde Visual Studio Code por método de la UNAM

3 Módulo para obtener los ejes equivalentes por el método de la AASHTO

3.1 Descripción del método de la AASHTO

El método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos se desarrolló a partir de la Prueba de Carreteras AASHO, realizada entre 1958 y 1960 en Ottawa, Illinois. Este estudio experimental involucró la construcción de tramos de carretera sujetos a diferentes cargas para evaluar el desempeño del pavimento. Uno de los objetivos básicos de esta prueba fue determinar la relación entre el número de repeticiones de cargas por ejes de diferentes magnitudes y configuraciones, y el comportamiento de diversas secciones de pavimentos flexibles.

El método AASHTO 93 utiliza conceptos como el Factor de Carga por Eje Equivalente (EALF), que se define como el daño causado por una pasada de un eje en particular en comparación con el daño causado por una pasada de un eje estándar, usualmente el eje sencillo de 8.2 ton. El diseño se basa en el número total de pasadas de un eje estándar durante el periodo de diseño, definido como eje equivalente como se muestra en la ecuación 9.

$$ESAL = \sum_{i=1}^m F_i n_i \quad (9)$$

Al estandarizar todos los ejes en una equivalente debe de existir una manera de catalogar el daño que producen los demás tipos de ejes en comparación con el eje equivalente por eso se establecieron factores de equivalencia, los cuales pueden ser calculados con la ecuación 10.

$$\log\left(\frac{W_{tx}}{W_{t18}}\right) = 4.79 \log(18 + 1) - 4.79 \log(L_x + L_2) + 4.33 \log(L_2) + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (10)$$



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

$$G_t = \log\left(\frac{4.2 - p_t}{4.2 - 1.5}\right) \quad (11)$$

$$\beta_x = 0.40 + \frac{0.081(L_x + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} L_2^{3.23}} \quad (12)$$

Donde W_{tx} es el número de aplicación de carga al final del tiempo t del eje X , W_{18} = Número de aplicación de carga al final del tiempo del eje estándar, L_x la carga del eje en Kips (1000 kgf = 2.204 kips), L_2 es el código de eje, 1 para eje sencillo, 2 para eje Tandem y 3 Tridem y p_t es la serviciabilidad terminal. De igual manera se debe de calcular el factor de crecimiento como se muestra en la ecuación 13.

$$\text{Factor de crecimiento} = \frac{(1+g)^n - 1}{g} \quad (13)$$

$$g = \frac{\text{rate}}{100} \quad (14)$$

Donde rate es la tasa de crecimiento y n el periodo de análisis. De tal manera que para calcular el número de ejes equivalentes se deben cuantificar el número de ejes de cada tipo que pasarán por la vialidad. Luego, estos valores se multiplican por el factor de crecimiento y por el factor de equivalencia del eje. La sumatoria de este proceso para cada tipo de eje da como resultado el número total de ejes equivalentes.

3.2 Utilización del módulo

El módulo AASHTO de Python que se presenta en este artículo cuenta con la ventaja de haberse realizado conforme a los pesos y vehículos de la NOM-012-SCT-2-2017.

3.2.1 Descarga del módulo

La instalación del módulo es similar a la descrita en la sección 2.3.1 para el módulo de la UNAM. Sin embargo, en este caso, se debe sustituir el nombre del módulo por "ejes_AASHTO".

3.1.2 Ejemplo de uso

Se utilizará el tránsito de la Tabla 1 con las características del tránsito de la tabla 3.

Tabla 3. Descripción del tránsito

Característica de Tránsito	Abreviación en el código	Valor
Serviciabilidad terminal	pt	2.5
Serviciabilidad Inicial	SN	5
Tipo de camino	camino	A
Tránsito Promedio Diario	TDPA	1200
Factor direccional	FD	1
Factor de utilización de carril	FC	0.5
Años de servicio	n	10
Tasa de crecimiento anual (%)	r	3.2
Porcentaje de vehículos cargados (%)	C	70



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

```
T3S2R3 = 0
T3S2R4 = 0
T2S2S2 = 0
T3S2S2 = 0
T3S3S2 = 2.4

pt = 2.5 #Serviciabilidad terminal
SN = 5 #Serviciabilidad inicial
camino = "A" #Tipo de camino
TDPA = 1200 #Tránsito Diario Promedio Anual
FD = 1 #Factor direccional (%)
FC = 0.5 #Factor de utilización de carril
n = 10 #Periodo de análisis
rate = 3.2 #Factor de crecimiento
Cargados = 70 #Porcentaje de vehículos cargados

transito = Transito(A2, B2, B3, B3p, B4, C2, C3, C3p, T2S1, T2S2, T3S2, T3S3, C2R2, C3R2, C3R3, T2S1R2, T2S2R2, T3S1R2,
T3S2R2, T3S2R3, T3S2R4, C2R3, T2S3, T3S1, T2S2S2, T2S1R3, T3S2S2, T3S3S2, T3S1R3)

aashto = Aashto(pt, SN, camino, TDPA, FD, FC, n, rate, Cargados)
```

Los ejes equivalentes por el metodo AASHTO son de: 7,263,500

Figura 2. Calculo de ejes equivalentes desde Visual Studio Code por método de la AASHTO

4 Módulo para obtener los espectros de carga

4.1 Descripción de espectros de carga

Entre los factores que afectan al pavimento, uno de los más significativos es el tránsito vehicular. A lo largo del artículo, hemos explorado métodos para caracterizar el tránsito, como el de la AASHTO y el de la UNAM. Sin embargo, un problema importante con estos métodos es la falta de precisión en la determinación de los pesos vehiculares. Aunque se basan en la norma de la SICT, esta norma solo especifica los pesos máximos por eje. Por lo tanto, es mejor medir el peso real de cada eje mediante básculas, lo que permite obtener un conocimiento más exacto de las cargas que circulan por el pavimento. Esto, a su vez, contribuye a un diseño estructural del pavimento más adecuado.

En el estudio de campo para espectros de carga, se proporcionan datos como el tipo de vehículo y el peso de cada eje. El primer paso es clasificar los ejes según el tipo de vehículo, ya sea sencillo, sencillo dual, tándem o tridem. Para un eje tridem, se debe obtener la suma de los tres ejes que lo conforman; lo mismo se aplica a los ejes tándem. En un espectro de carga, se deben clasificar los ejes de cada vehículo, ordenarlos por rango de pesos y obtener la frecuencia de cada rango para posteriormente graficarlo.

En términos de simplicidad, el uso del eje equivalente es más sencillo, ya que todas las cargas se remiten a una sola configuración de eje y al número de veces que este eje se aplicará. Sin embargo, cuando se utilizan espectros de carga, se debe calcular la respuesta esfuerzo-deformación para cada tipo de eje y determinar el daño correspondiente para cada uno. Posteriormente, se calcula el daño acumulado.

Aunque diseñar un pavimento caracterizando el tránsito mediante espectros de carga resulta más complejo, ofrece una mayor precisión. Los espectros de carga describen la distribución de cargas en términos de peso y porcentaje, proporcionando una representación detallada de las cargas que impactan el pavimento y permitiendo un diseño más preciso y optimizado.

En cuanto al desarrollo de espectros de carga se remonta a la Prueba de Carreteras AASHO. En dónde se dedujo que el impacto de cada carga de eje individual sobre el pavimento flexible puede estimarse de acuerdo con la denominada ley de la cuarta potencia [3, 4]. La ley de la cuarta potencia implica que el daño



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

al pavimento causado por el paso de vehículos aumenta exponencialmente con el incremento de sus cargas por eje. Esta relación se denomina Factor de Equivalencia de Carga (LEF, por sus siglas en inglés) [5]:

$$LEF = \left(\frac{X_r}{L_s}\right)^m \quad (15)$$

Donde X_r es la carga del eje en cuestión, L_s es la carga del eje estándar con el mismo numero de ejes que X_r , m potencia a la que se eleva el daño relativo que comúnmente es 4 pero esto puede variar.

De igual manera el daño al pavimento es la sumatorio de daño que le produce cada pasada de un eje dado por lo que a partir de aquí puede obtenerse las contribuciones de las cargas de cada eje en la distribución como una sumatoria, a esto se le denomina Factor de Espectro de carga o LSF por sus siglas en inglés, no se debe de perder de cuenta que estos análisis se hacen por cada tipo de eje por lo tanto tendremos LSF para eje sencillo, para eje sencillo dual, para eje tándem y para eje tridem.

$$LSF = \sum_{r=1}^R \left(\frac{X_r}{L_s}\right)^m q_r \quad (16)$$

En donde R es el número total de intervalos de carga y q_r es la frecuencia normalizada de carga o el ancho de clase. Si se multiplica LSF por el numero de ejes de la carga dada se obtienen los ESALs.

$$ESALs = N \sum_{r=1}^R \left(\frac{X_r}{L_s}\right)^m q_r \quad (17)$$

Donde N es el número total de ejes. Para describir de manera matemática un espectro de carga se puede hacer a través de una distribución log-normal multimodal, donde cada espectro de carga queda descrito por tres medias, tres desviaciones estándar y tres pesos como se muestra en la ecuación 18.

$$f(X) = W_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi x \sigma_1}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-u_1}{\sigma_1}\right)^2} + W_2 \frac{1}{\sqrt{2\pi x \sigma_2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-u_2}{\sigma_2}\right)^2} + (W_1 + W_2 + W_3) \frac{1}{\sqrt{2\pi x \sigma_3}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-u_3}{\sigma_3}\right)^2}$$

Donde μ_k es la media, σ_k es la desviación estándar y W_k representa los pesos del modelo, en donde la sumatoria de los tres pesos debe ser igual a uno, donde k representa el k th modo.

4.2 Descripción del módulo

La caracterización de espectros de carga requiere la manipulación de diferentes datos para obtener los espectros de carga de cada tipo de eje. Este proceso es largo y repetitivo, y al manejar una gran cantidad de datos, se corre el riesgo de cometer errores. Para simplificar este trabajo, se desarrolló un módulo en Python que utiliza la biblioteca Pandas, la cual permite manipular datos de hojas de cálculo y calcular el espectro de carga en cuestión de segundos. Esto no solo simplifica el trabajo al momento de trabajar con espectros de carga, sino que también facilita la adopción de estos métodos más precisos para el diseño de pavimentos.

4.1 Descarga del módulo

La instalación del módulo es similar a lo explicado en la sección 2.3.1; sin embargo, cambian los nombres de los módulos por “eje_sencillo”, “eje_sencillo_dual”, “eje_tandem” y “eje_tridem”.

Una vez descargado e instalado el módulo, la hoja de cálculo deberá estar en formato CSV y tener los encabezados como se muestra en la Figura 3. Este paso es crucial para que el programa pueda identificar correctamente cada una de las columnas. Posteriormente, el usuario deberá ingresar la ruta del archivo CSV de la siguiente manera:

```
ruta_archivo = "~/Desktop/datos_vehiculos.csv"
```



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Espectro_eje_tridem(ruta_archivo)

VEHICULO	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 6	Eje 7	Eje 8	Eje 9
C4	2382	4792	0	0	0	0	0	0	0
C2	2382	4792	0	0	0	0	0	0	0
C2	1306	2157	0	0	0	0	0	0	0
C2	3700	8052	0	0	0	0	0	0	0
C2	6480	9930	0	0	0	0	0	0	0
C2	1579	2962	0	0	0	0	0	0	0
C2	2123	3678	0	0	0	0	0	0	0
C2	2465	4155	0	0	0	0	0	0	0
C2	2443	3619	0	0	0	0	0	0	0
C2	1681	3868	0	0	0	0	0	0	0
C2	1321	2464	0	0	0	0	0	0	0
C2	3308	4793	0	0	0	0	0	0	0
C2	2010	2630	0	0	0	0	0	0	0
C2	2169	4756	0	0	0	0	0	0	0
C2	1788	4571	0	0	0	0	0	0	0
C2	2603	4827	0	0	0	0	0	0	0
C2	1303	2245	0	0	0	0	0	0	0
C2	2986	3610	0	0	0	0	0	0	0
C2	1291	3517	0	0	0	0	0	0	0
C2	4992	9932	0	0	0	0	0	0	0
C2	4792	9290	0	0	0	0	0	0	0

Figura 3. Ejemplo de hoja de cálculo

Al ejecutar el programa, este generará el espectro de carga y realizará la gráfica del ajuste de la función log-normal multimodal como se muestra en la Figura 4 y la Figura 5 respectivamente, proporcionando además los datos que describen esta función, tales como tres medias, tres desviaciones estándar y tres pesos, además del valor de LSF, el número total de ejes, la diferencia al cuadrado del ajuste de la función y su coeficiente de correlación como se muestra en la Figura 6.

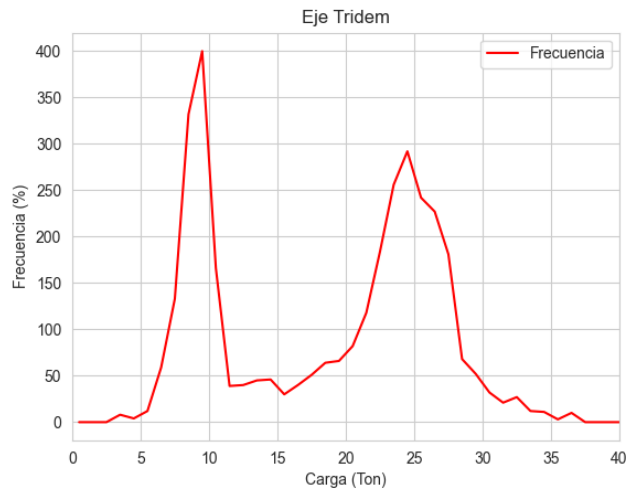


Figura 4. Espectro de carga de eje tridem



Asociación Mexicana
del Asfalto, A.C.

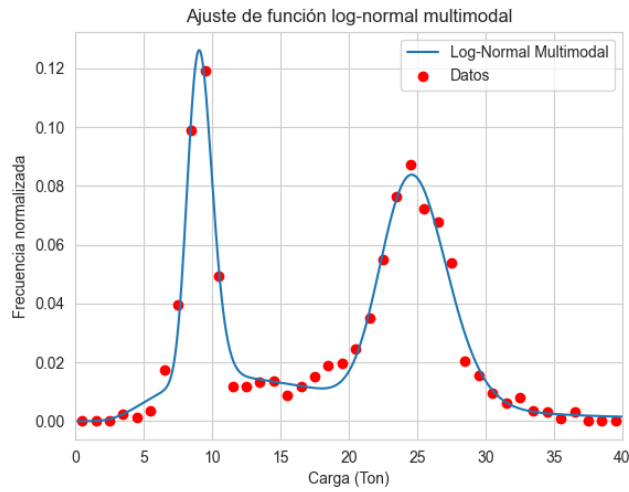


Figura 5. Ajuste de función log-normal multimodal de eje tridem

```
File Edit Selection View Go Run ...
clases_git_hub
importacion.py x eje_tridem.py
espectros > tridem > importacion.py > ...
1 import eje_tridem
2 ruta_archivo = "~/Desktop/datos_vehiculos.csv"
3 eje_tridem(ruta_archivo)

PROBLEMS 34 OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
2 25.348 1.473381 1.473381
3 26.149 1.670740 1.670740
4 10.257 0.039552 0.039552
... ..
3348 10.279 0.039893 0.039893
3349 22.470 0.910963 0.910963
3350 22.018 0.839847 0.839847
3351 26.195 1.682528 1.682528
3352 9.348 0.027287 0.027287

[3353 rows x 3 columns]
Media 1: 2.2132321051320822
Desviacion estandar 1: 0.0991066906396397
Peso 1: 0.2530867053889431
Media 2: 2.757315955083291
Desviacion estandar 2: 0.5992766204844611
Peso 2: 0.2967179222025355
Media 3: 3.213719903425411
Desviacion estandar 3: 0.0972060323968591
Peso 3: 0.4501953724085213
LSF = 0.89763
Numero total de ejes = 3353
Diferencias al cuadrado = 0.0007416613804503314
Coeficiente de correlacion = 0.9939813435915368

[Done] exited with code=0 in 16.524 seconds
```

Figura 6. Resultados del módulo de espectros de carga para un eje tridem

5 Conclusiones

El empleo de las bibliotecas creadas en Python para el análisis del tránsito vehicular y cargas simplifica la obtención e interpretación de datos. Con solo importar el módulo y proporcionar los datos requeridos, se pueden obtener los ejes equivalentes y espectros de carga.



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

El módulo para calcular ejes equivalentes por el método de la UNAM y de la AASHTO están adaptados a las actualizaciones de la normativa NOM-012-SCT-2-2017.

El módulo de Python para calcular ejes equivalentes por el método de la UNAM ofrece flexibilidad y precisión al permitir calcular los ejes equivalentes a cualquier profundidad y agregar sobrecargas en forma de porcentaje. Esto es crucial para considerar las sobrecargas vehiculares, una de las principales causas de deterioro de los pavimentos.

El uso de espectros de carga proporciona una representación más precisa y detallada de las cargas vehiculares, mejorando el diseño estructural del pavimento. Aunque es un método más complejo, ofrece una ventaja significativa en términos de exactitud en comparación con la estandarización a un eje equivalente.

La integración de estas herramientas en Python facilita la obtención e interpretación de datos, democratizando el acceso a técnicas de análisis de pavimentos avanzadas gracias a la naturaleza de código abierto del lenguaje y su extensa comunidad de usuarios y desarrolladores.

El desarrollo de estos módulos no solo simplifica el trabajo repetitivo y potencialmente propenso a errores en el manejo de datos, sino que también promueve la adopción de métodos más precisos en el diseño de pavimentos. La biblioteca Pandas, utilizada en estos módulos, facilita la manipulación de datos en hojas de cálculo y el cálculo de espectros de carga en cuestión de segundos.

Todos los módulos presentados en este artículo forman parte del programa de análisis de pavimento PAV Analyzer.

El desarrollo de estos módulos en Python para el análisis de cargas vehiculares conforme a diferentes metodologías y normas proporciona herramientas vitales para el diseño, mantenimiento y conservación de pavimentos, contribuyendo así a la sostenibilidad y resiliencia de las vialidades.

6 Referencias

- [1] Sánchez, M. (2011). *Diseño de pavimentos flexibles CA-60*. Ciudad de México., México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- [2] Corro, S., Magallanes, R., Prado, G., (1981). *Instructivo para diseño estructural de pavimentos flexibles*. Ciudad de México., México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- [3] AASHTO (1993). *Guide for design of pavement structures*. Washington, DC, EUA.
- [4] Huang, (2004). *Pavement Analysis and design* (2da ed.). EUA.
- [5] Prozzi, J., Hong, F. (2006). *Traffic Characterization for a Mechanistic-Empirical Pavement*. Austin, Texas., EUA: The University of Texas at Austin.