

# Propuesta de mejora operacional utilizando simulación de eventos discretos, estudio del sistema de bicicletas públicas del Valle de Aburrá EnCicla

Estaciones Campus Nacional - Suramericana

Arias, Valentina · Callejas, Andres Felipe · Castillo, Daniel  · Del Rio, Orlando

Fecha: 23 de junio de 2023

**Resumen** El sistema de transporte de bicicletas EnCicla juega un papel fundamental en la movilidad de los estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Con el objetivo de mejorar la disponibilidad de bicicletas en las estaciones Suramericana y Campus Nacional, se propone utilizar la simulación de eventos discretos. Se realiza un estudio exhaustivo que se centra en identificar deficiencias o excedentes de inventario, evaluar la demanda y los tiempos de espera en las estaciones. Se exploran diferentes escenarios y se emplean datos reales para validar el modelo de simulación propuesto. Los resultados obtenidos permiten identificar estaciones que pueden ceder su inventario de bicicletas, e incluso establecer parámetros mínimos para un funcionamiento óptimo del sistema.

**Palabras clave** Simulación de Eventos Discretos · Transporte Público · EnCicla · Mejora Operacional

## 1 Definición del problema

El principal objetivo es presentar una propuesta de mejora operativa para dos estaciones del sistema EnCicla. Se ha observado que durante el intervalo de 2 a 4 de la tarde, la estación Campus Nacional experimenta una demanda mayor que el nivel de restitución de bicicletas

provenientes de otras estaciones. Además, el stock inicial de bicicletas no es suficiente para satisfacer dicha demanda, lo que resulta en colas demoradas, especialmente al final del intervalo. En contraste, durante esa misma hora, a pesar de que la estación suramericana también experimenta un bajo nivel de restitución, generalmente cuenta con un inventario disponible. Por lo tanto, la alternativa de solución a evaluar consiste en transferir el excedente de bicicletas de una estación a la otra.

## 2 Formulación del problema

El sistema EnCicla es un sistema de transporte público individualizado en el Área Metropolitana del Valle del Aburrá. Permite a los usuarios solicitar bicicletas en préstamo en cualquiera de las múltiples estaciones y devolverlas en otra estación dentro de una hora. Sin embargo, la disponibilidad de bicicletas en cada estación depende de la carga y descarga realizada por camiones, así como del flujo de usuarios en el sistema. Se han seleccionado las estaciones Campus Nacional y Suramericana para el análisis, ya que son puntos de interés para los estudiantes de la Universidad Nacional Sede Medellín.

En Campus Nacional, se ha identificado una alta demanda de bicicletas que excede la velocidad de reposición y el stock inicial. Esto genera colas prolongadas, especialmente al final del intervalo analizado. En contraste, Suramericana tiene capacidad suficiente para satisfacer la demanda durante el mismo periodo.

El objetivo principal es entonces, entregar una propuesta de mejoramiento operacional que optimice el suministro de bicicletas en ambas estaciones del sistema EnCicla, teniendo en cuenta la alta demanda observada en

---

Andres Felipe Callejas Ruiz  
E-mail: [acallejasr@unal.edu.co](mailto:acallejasr@unal.edu.co)

Daniel Castillo Giraldo  
E-mail: [dcastillogi@unal.edu.co](mailto:dcastillogi@unal.edu.co)

Orlando Esteban Del Rio Cantillo  
E-mail: [odelr@unal.edu.co](mailto:odelr@unal.edu.co)

Valentina Arias Quiroz  
E-mail: [variasq@unal.edu.co](mailto:variasq@unal.edu.co)

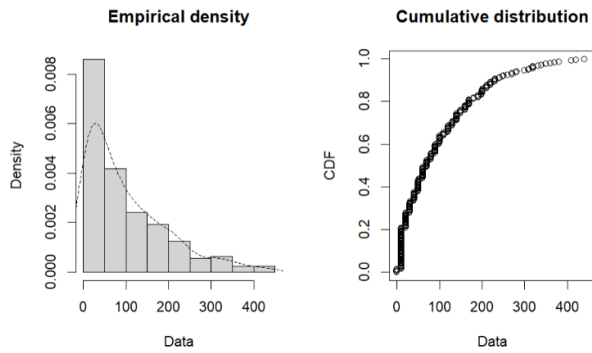


Fig. 1 Histograma devoluciones Suramericana

la estación de la Camps Nacional durante el intervalo de 2 a 4 de la tarde y la disponibilidad de bicicletas en la estación Suramericana.

Los esfuerzos se enfocarán en dos medidas de desempeño clave para la simulación: reducir la cantidad de personas en la fila y asegurar que menos del 90% de los usuarios esperen una bicicleta por más de 3 minutos. Además, se busca encontrar el punto de equilibrio entre bicicletas y demanda, evitando el no uso de bicicletas en la estación. Cabe destacar que, desde el inicio, se considera que los operarios del sistema son los mínimos requeridos para el funcionamiento de las estaciones, y su ocupación no se considera un factor que genere grandes colas en el sistema, por lo tanto, se ignoran desde el inicio de la simulación.

Desde el inicio de la simulación, se supondrá que el camión llegará a Campus Nacional 10 minutos después de iniciada la simulación, basado en análisis de tiempos y datos de tráfico. En el proceso de carga o descarga de bicicletas, el funcionamiento de la estación no se ve afectado, ya que el camión encargado de estas tareas trae consigo a sus propios operarios.

Es importante destacar que resulta imposible estimar de manera precisa sin datos confidenciales administrados por EnCicla cómo la mejora operativa de una estación puede afectar a otra. En teoría, si se mejora la disponibilidad de bicicletas en una estación, se espera que la tasa de devoluciones de bicicletas en la otra estación aumente. Sin embargo, para considerar este escenario, sería necesario tener acceso a información específica y no pública sobre los lugares de préstamo y devolución de las bicicletas.

### 3 Datos de entrada

Para llevar a cabo la simulación y lograr los objetivos establecidos, es necesario determinar las **distribuciones de tiempos entre llegadas y salidas** de cada estación

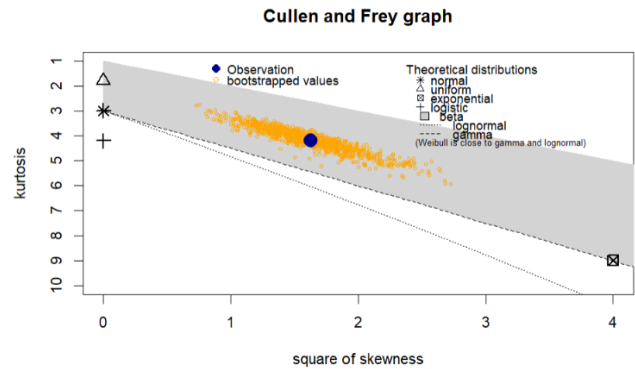


Fig. 2 Cullen y Frey, devoluciones Suramericana

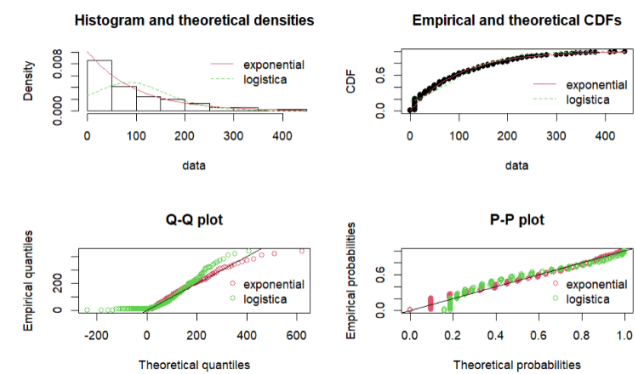


Fig. 3 Resumen estadístico devoluciones Suramericana

y los **tiempos de servicio**. A partir de los datos recolectados y su método de obtención, es posible extraer información clave, como la cantidad inicial de bicicletas y el número de personas en la fila en un momento determinado, que juntos se emplearán para la validación del modelo propuesto.

#### 3.1 Tiempos entre llegadas/salidas

Existen dos eventos fundamentales para este estudio: llegadas y salidas, ambos observados por individual en la estación Suramericana y Campus Nacional. Esto se decidió, ya que cada estación tiene características particulares que afectan el flujo de entidades, la estación Campus Nacional sirve a la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Campus Volador, con más de 13,000 estudiantes matriculados [1], y la estación Suramericana sirve al sistema Metro de Medellín, que transporta a 300.55 millones de pasajeros anualmente [2].

### 3.1.1 Suramericana

Para registrar los tiempos entre llegadas y salidas de bicicletas en la estación Suramericana<sup>1</sup>, se optó por consultar automáticamente la página web de EnCicla<sup>2</sup> cada 10 segundos<sup>3</sup>. La página web proporciona información de la cantidad de bicicletas en la estación, por tanto su variación, ya sea positiva o negativa, se considero un préstamo o devolución de una bicicleta (omitiendo variaciones grandes relacionadas con el camión surtiendo la estación). Se verificó manualmente mediante la comparación de la cantidad de bicicletas registrada en la estación con la información proporcionada en la página web para ver si la actualización era en tiempo real, y fue así.

Después de recolectar los datos, se llevó a cabo el análisis estadístico. En este análisis, se utilizó la siguiente fórmula [3] para calcular el tamaño de muestra con un nivel de confianza del 95%:

$$\frac{Z_{\alpha}^2 \sigma^2}{e^2} \quad (1)$$

En primer lugar, se analizó el **tiempo entre llegadas de las personas que devuelven bicicletas**. Se observó una desviación estándar muestral de 95.32 entregas y se estableció una precisión deseada de 12 observaciones. Como resultado, se determinó que se requerirían al menos 243 muestras.

Los datos obtenidos para la distribución indican una media de 99,21 segundos con una desviación estándar de 95,32 segundos.

Realizado el histograma de frecuencias (Ver Figura 1), se evidencia asimetría positiva en los datos, es decir, la "cola" a la derecha de la media es más larga que la de la izquierda, en otras palabras, hay valores más separados de la media a la derecha. Lo anterior, es corroborado por los valores correspondientes al sesgo estimado, 1,275981, positivo y la kurtosis estimada, 4,198269, mayor que 3. Estos, indican una mayor concentración de datos alrededor de la media, con colas más pesadas y un pico más pronunciado.

El análisis descriptivo de los datos indicó que dos distribuciones constituían especiales candidatas para ser ajustadas, exponencial, por la forma del histograma y beta, acorde a lo mostrado en el gráfico de Cullen and Frey (Ver Figura 2). Sin embargo, esta última es descartada dado que está definida en el intervalo (0, 1) y se utiliza comúnmente para modelar variables aleatorias

<sup>1</sup> Para acceder al conjunto de datos, consultar la carpeta *data/suramericana* en el repositorio adjunto al informe

<sup>2</sup> <https://encicla.metropol.gov.co/>

<sup>3</sup> Referirse a la carpeta *scraper* en el repositorio adjunto al informe para obtener más detalles

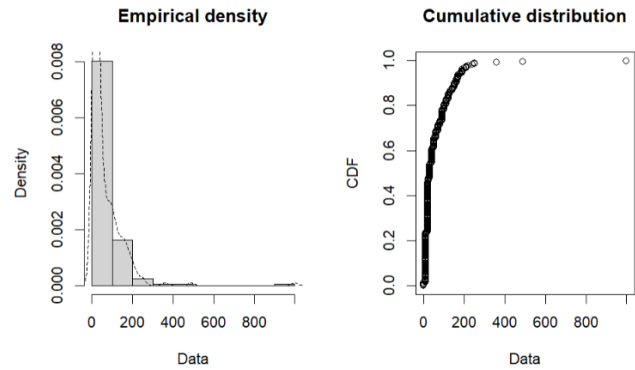


Fig. 4 Histograma préstamos Suramericana

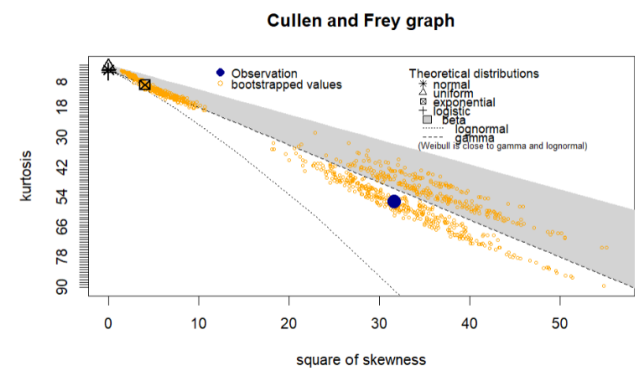


Fig. 5 Cullen y Fray préstamos Suramericana

que están limitadas en ese rango, como proporciones o probabilidades.

Se ajustó así, una logística, como comparación. El estadístico KS es menor para la distribución exponencial indicando así un mejor ajuste de los datos. Sin embargo Cramer y AD presentan evidencias contradictorias, siendo mayor el primero para la distribución logística y mucho mayor el segundo para la exponencial. En cuanto a los criterios de información tanto Akaike como BIC son menores para el modelo exponencial que para el modelo logístico.

Finalmente, en el Q-Q plot (Ver Figura 3) se evidenció un mejor ajuste para los datos empleando la exponencial que la logística, aunque en ambas se evidencian carencias. Por ende, la primera fue seleccionada.

La otra variable analizada en la estación Suramericana fue el **tiempo entre llegadas de las personas que requieren préstamo de bicicletas**. Se observó una desviación estándar muestral de 85.49 entregas y se estableció una precisión deseada de 10 observaciones. Como resultado, se determinó que se requerirían al menos 281 muestras.

Los datos obtenidos para la distribución indican una media de 61,51 segundos con una desviación estándar de 85,49 segundos.

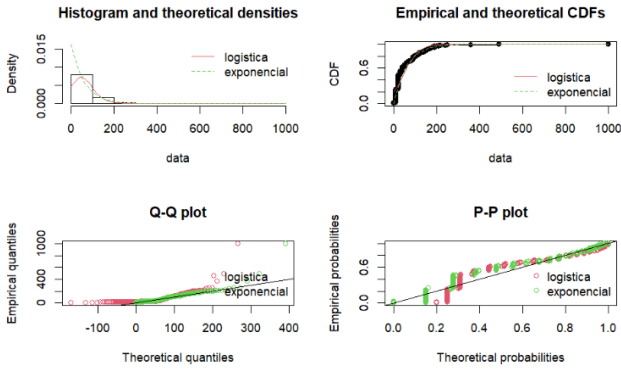


Fig. 6 Resumen estadístico préstamos Suramericana

En el histograma de frecuencias (Ver Figura 4), se evidencia asimetría positiva en los datos, es decir, la "cola" a la derecha de la media es más larga que la de la izquierda, en otras palabras, hay valores más separados de la media a la derecha. Lo anterior, es corroborado por los valores correspondientes al sesgo estimado, 5,622315, positivo y la curtosis estimada, 55,89, mayor que 3. Estos, indican una fuerte concentración de datos alrededor de la media, con colas más pesadas y un pico mucho más pronunciado.

El análisis descriptivo de los datos indicó que dos distribuciones constituían especiales candidatas para ser ajustadas, exponencial, por la forma del histograma y beta, acorde a lo mostrado en el gráfico de Cullen and Frey (Ver Figura 5). Sin embargo, esta última es descartada dado que está definida en el intervalo  $(0, 1)$  y se utiliza comúnmente para modelar variables aleatorias que están limitadas en ese rango, como proporciones o probabilidades.

Se ajustó así, una logística, como comparación. El estadístico KS es menor para la distribución exponencial indicando así un mejor ajuste de los datos. Sin embargo Cramer y AD presentan evidencias contradictorias, siendo mayor el primero para la distribución logística y mucho mayor el segundo para la exponencial. En cuanto a los criterios de información tanto Akaike como BIC son menores para el modelo exponencial que para el modelo logístico.

Finalmente, en el Q-Q plot (Ver Figura 6) se evidenció un mejor ajuste para los datos empleando la exponencial que la logística, aunque en ambas se evidencian carencias. Por ende, la primera fue seleccionada.

### 3.1.2 Campus Nacional

En el caso de la estación Campus Nacional<sup>4</sup>, se observó que la disponibilidad de bicicletas era escasa la mayor

<sup>4</sup> Para acceder al conjunto de datos, consultar la carpeta *data/unal* en el repositorio adjunto al informe

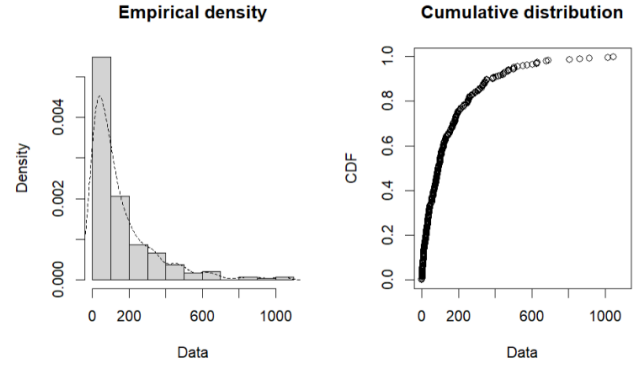


Fig. 7 Histograma devoluciones Campus Nacional

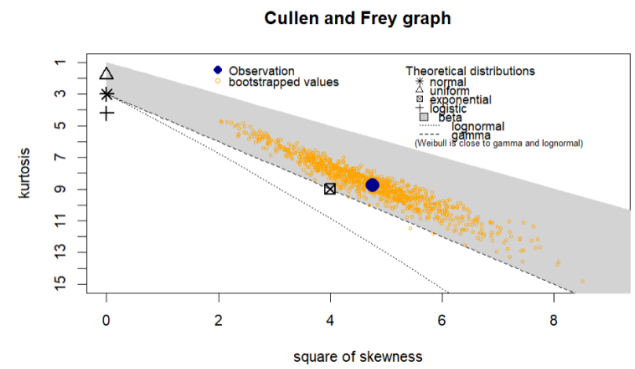


Fig. 8 Cullen y Fray devoluciones Campus Nacional

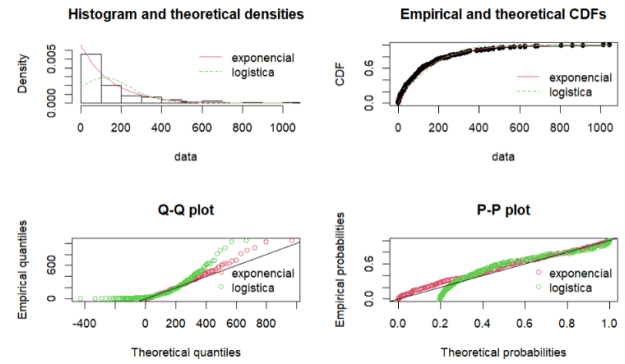


Fig. 9 Resumen estadístico devoluciones Campus Nacional

parte del tiempo. Debido a esta limitación, la recopilación de datos a través de la página web resultaba poco realista, ya que no permitía visualizar la fila de personas esperando bicicletas. Por lo tanto, se optó por realizar una recolección presencial de los datos utilizando la herramienta Datarizer [4]. Se implementó un botón para cada evento y se registró manualmente cada vez que una persona llegaba o salía de la estación. Además del procedimiento anterior, se registró también la cantidad de bicicletas en la estación usando la página web de EnCicla.

Después de recolectar los datos, se llevó a cabo el análisis estadístico. En primer lugar, se analizó el **tiempo entre llegadas de las personas que devuelven bicicletas**. Con una desviación estándar muestral observada de 179.64 entregas y una precisión deseada de 21 observaciones, se encontró que serían necesarias al menos 282 muestras.

Los datos obtenidos para la distribución indican una media de 151,89 segundos con una desviación estándar de 179,64 segundos.

En el histograma de frecuencias (Ver Figura 7), se evidencia asimetría positiva en los datos, es decir, la "cola" a la derecha de la media es más larga que la de la izquierda, en otras palabras, hay valores más separados de la media a la derecha. Lo anterior, es corroborado por los valores correspondientes al sesgo estimado, 2,18, positivo y la curtosis estimada, 8,77, mayor que 3. Estos, indican una concentración de datos alrededor de la media, con colas pesadas y un pico más pronunciado.

El análisis descriptivo de los datos indicó que dos distribuciones constituían especiales candidatas para ser ajustadas, exponencial, por la forma del histograma y beta, acorde a lo mostrado en el gráfico de Cullen and Frey (Ver Figura 8). Sin embargo, esta última es descartada dado que está definida en el intervalo (0, 1) y se utiliza comúnmente para modelar variables aleatorias que están limitadas en ese rango, como proporciones o probabilidades.

Se ajustó así, una logística, como comparación. El estadístico KS es menor para la distribución exponencial indicando así un mejor ajuste de los datos. Sin embargo Cramer y AD presentan evidencias contradictorias, siendo mayor el primero para la distribución logística y mucho mayor el segundo para la exponencial. En cuanto a los criterios de información tanto Akaike como BIC son menores para el modelo exponencial que para el modelo logístico.

Finalmente, en el Q-Q plot (Ver Figura 9) se evidenció un mejor ajuste para los datos empleando la exponencial que la logística, aunque en ambas se evidencian carencias. Por ende, la primera fue seleccionada.

La otra variable analizada en la estación Campus Nacional fue el **tiempo entre llegadas de las personas que requieren préstamo de bicicletas**. Con una desviación estándar muestral observada de 117.68 personas y una precisión deseada de 10 observaciones. Se encontró que serían necesarias al menos 440 muestras.

Los datos obtenidos para la distribución indican una media de 85,70 segundos con una desviación estándar de 117,68 segundos.

En el histograma de frecuencias, se evidencia asimetría positiva en los datos, es decir, la "cola" a la derecha

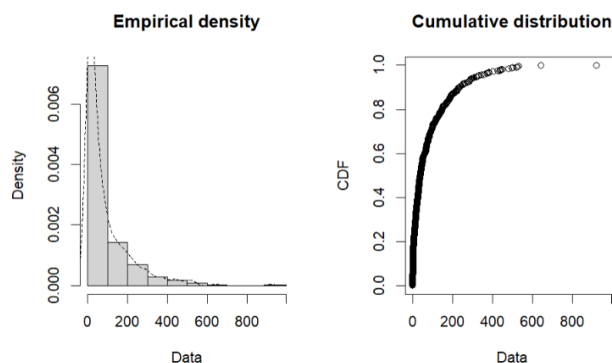


Fig. 10 Histograma préstamos Campus Nacional

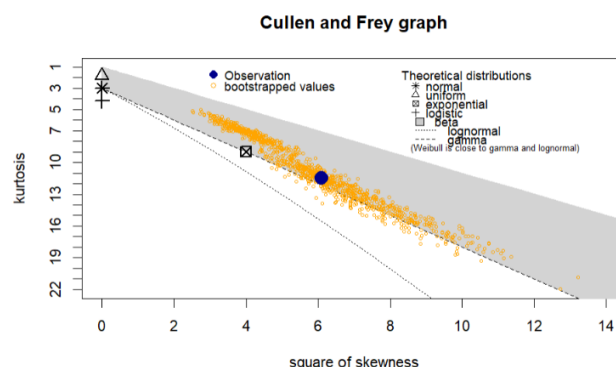


Fig. 11 Cullen y Fray préstamos Campus Nacional

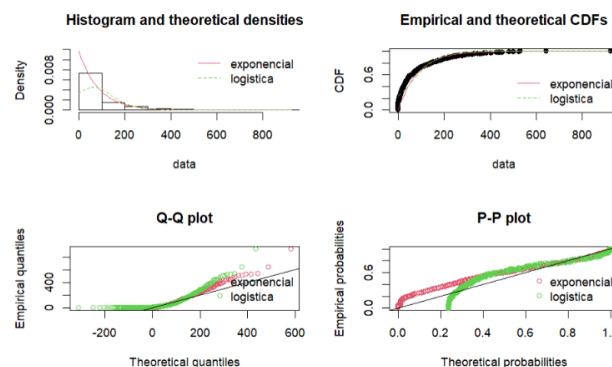


Fig. 12 Resumen estadístico préstamos Campus Nacional

de la media es más larga que la de la izquierda, en otras palabras, hay valores más separados de la media a la derecha. Lo anterior, es corroborado por los valores correspondientes al sesgo estimado, 2,46, positivo y la curtosis estimada, 11,512, mayor que 3. Estos, indican una concentración de datos alrededor de la media, con colas pesadas y un pico más pronunciado.

El análisis descriptivo de los datos indicó que dos distribuciones constituían especiales candidatas para ser ajustadas, exponencial, por la forma del histograma y beta, acorde a lo mostrado en el gráfico de Cullen and Frey. Sin embargo, esta última es descartada dado que



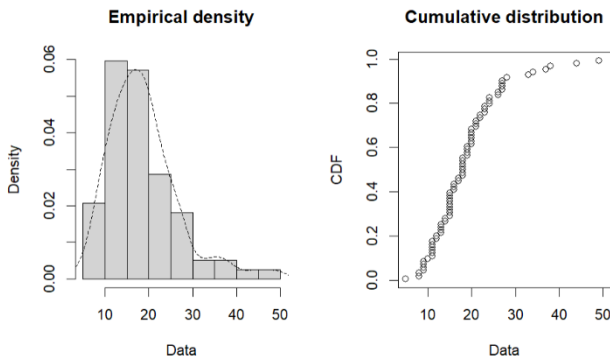


Fig. 13 Histograma préstamo bicicletas

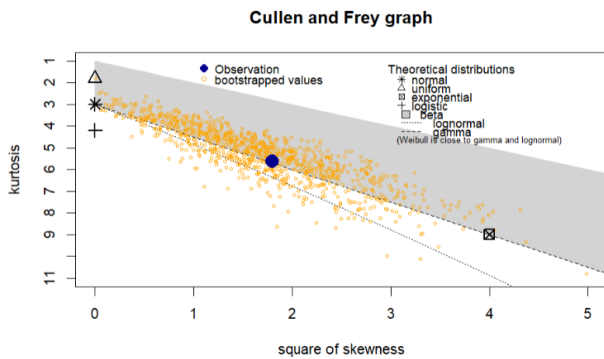


Fig. 14 Cullen y Fray préstamo bicicletas

está definida en el intervalo  $(0, 1)$  y se utiliza comúnmente para modelar variables aleatorias que están limitadas en ese rango, como proporciones o probabilidades.

Se ajustó así, una logística, como comparación. El estadístico KS es menor para la distribución exponencial indicando así un mejor ajuste de los datos. Por su parte, Cramer y AD presentan evidencias similares, siendo ambos mayores para la distribución exponencial, sugiriendo que se ajusta mejor a los datos. En cuanto a los criterios de información tanto Akaike como BIC son menores para el modelo exponencial que para el modelo logístico.

Finalmente, en el Q-Q plot se evidenció un mejor ajuste para los datos empleando la exponencial que la logística, aunque en ambas se evidencian carencias. Por ende, la primera fue seleccionada.

### 3.2 Tiempo de servicio

Es importante destacar que estos datos de entrada no dependen de la estación, sino de la velocidad del operador. Por esta razón, se recopilaban datos<sup>5</sup> con cuatro operadores diferentes. Este proceso se llevó a cabo de

<sup>5</sup> Para acceder a este conjunto de datos, consultar la carpeta *data* en el repositorio adjunto al informe.

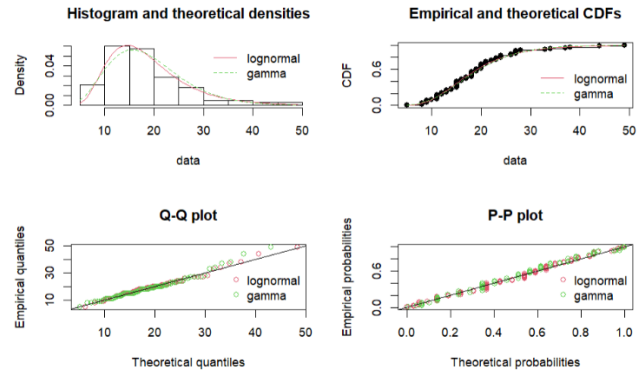


Fig. 15 Resumen estadístico préstamo bicicletas

manera presencial en la estación Campus Nacional utilizando Datarizer y midiendo el tiempo que se demoraba el operador en atender a un usuario. Cabe mencionar que se consideraron dos tipos de servicios: servicio de préstamo de bicicletas y servicio de devolución de bicicletas.

Posterior a la recolección de datos, se analizó el **servicio de préstamo de bicicletas**. Con una desviación estándar muestral observada de 8.11 préstamos y una precisión deseada de 2 observaciones. Se encontró que serían necesarias al menos 64 observaciones.

Los datos obtenidos para la distribución indican una media de 18,79 préstamos con una desviación estándar de 8,11. Realizado el histograma de frecuencias (Ver Figura 13), se evidencia asimetría positiva en los datos, es decir, la "cola" a la derecha de la media es más larga que la de la izquierda, en otras palabras, hay valores más separados de la media a la derecha. Lo anterior, es corroborado por los valores correspondientes al sesgo estimado, 1,340155, positivo y la curtosis estimada, 5,63196, mayor que 3. Estos, indican una mayor concentración de datos alrededor de la media, con colas más pesadas y un pico más pronunciado.

Realizado el análisis descriptivo de los datos se observó que dos distribuciones constituían especiales candidatas para ser ajustadas, gamma y lognormal. El estadístico KS es relativamente bajo para ambos casos indicando el buen ajuste de los datos. Sin embargo, los estadísticos de Cramer y Anderson - Darling son mayores para la distribución gamma sugiriendo un mejor ajuste a las observaciones. En cuanto a los criterios de información tanto Akaike como BIC son menores para el modelo lognormal que para el modelo gamma.

Finalmente, en el Q-Q plot (Ver Figura 15) se evidenció un mejor ajuste para los datos empleando lognormal que el gamma. Por ende, la primera fue seleccionada.

Con respecto al otro servicio analizado, **servicio de devolución de bicicletas**, con una desviación estándar

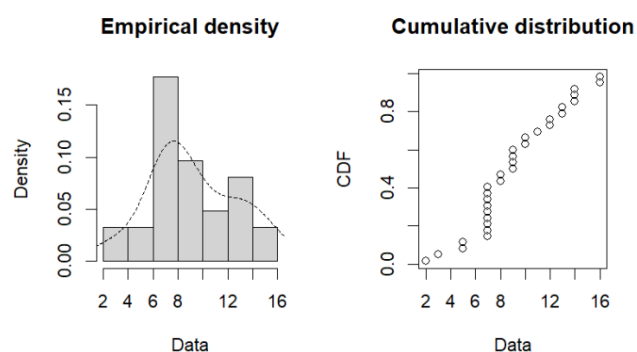


Fig. 16 Histograma devolución bicicletas

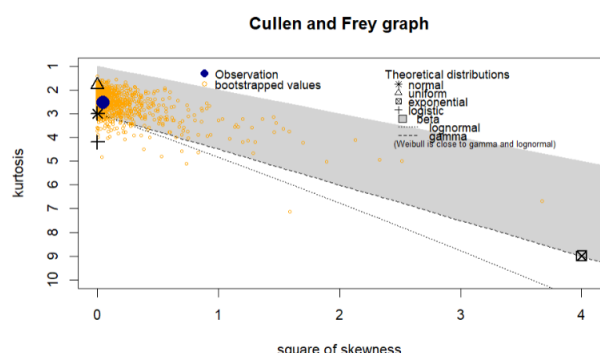


Fig. 17 Cullen y Fray devolución bicicletas

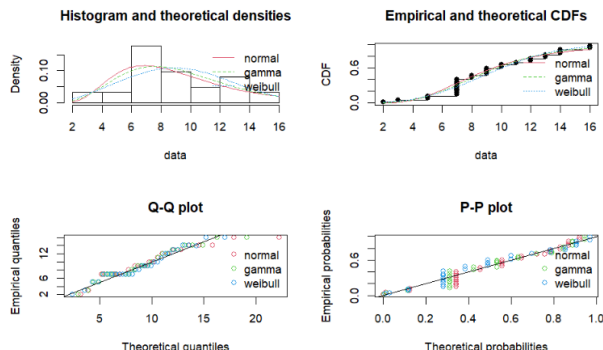


Fig. 18 Resumen estadístico devolución bicicletas

muestral observada de 3.57 recepciones y una precisión deseada de 2 observaciones. Se encontró que serían necesarias al menos 13 muestras.

Los datos obtenidos para la distribución indican una media de 9,19 recepciones con una desviación estándar de 3,57. Realizado el histograma de frecuencias (Ver Figura 16), se evidencia cierto grado de simetría en los datos.

Lo anterior, es corroborado por los valores correspondientes al sesgo estimado, 0,2106347, cercano a cero y la curtosis estimada, 2,532888, menor que 3. Esto permite inferir que los datos muestran una simetría cercana a la distribución normal. Empleando el gráfico de

Tabla 1 Bicicletas iniciales en el sistema

Día	Suramericana	Campus Nacional
1	29	25
2	7	9
3	17	13
4	17	3
5	35	19
6	40	1

Cullen and Fray (Ver Figura 17) se corrobora esta suposición.

Realizado el análisis descriptivo de los datos se observó que, al menos, tres distribuciones se constituían como especiales candidatas para ser ajustadas, gamma, weibull y normal.

La distribución Weibull en el estadístico KS presenta los valores más bajos indicando así un mejor ajuste a los datos. Sin embargo, Cramer y AD presentan valores más altos en la distribución normal, sugiriendo que esta se puede ajustar mejor a los datos. En cuanto a los criterios de información tanto Akaike como BIC son menores para el modelo weibull que para el resto de los modelos.

Finalmente, en el Q-Q plot (Ver Figura 18) se evidenció un mejor ajuste para los datos empleando weibull que el resto de las distribuciones. Por ende, esta fue seleccionada.

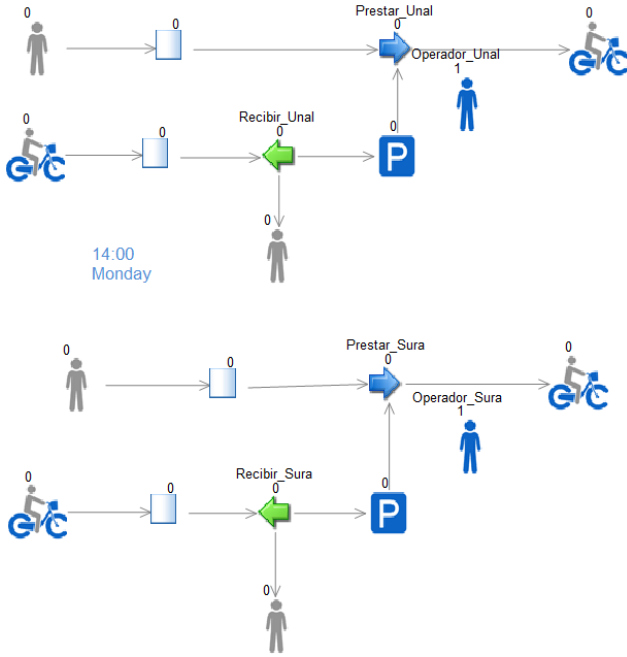
### 3.3 Datos de verificación

La comparación entre el modelo y la situación real se basa en la cantidad inicial de bicicletas en la estación y la cantidad de personas en la fila después de un tiempo determinado de ejecución de la simulación.

Al inicio de cada período de recopilación de datos, se obtuvo la cantidad de bicicletas en las estaciones a través de la página web de EnCicla. Los resultados se encuentran disponibles en la Tabla 1. En cuanto a las filas en cada estación, en la estación Campus Nacional, se observó que, en promedio, había 9 personas en la fila después de una hora y 12 personas al finalizar la recolección de datos (después de 2 horas). En cuanto a la estación Suramericana, según la visita de reconocimiento, se constató que aunque las filas no eran frecuentes, en caso de presentarse, solían constar de aproximadamente 3 personas.

## 4 Modelo de simulación

En términos generales, el sistema se basa en el flujo de agentes a través de dos estaciones independientes de EnCicla. Estos agentes interactúan de dos formas con la



**Fig. 19** Modelo SIMUL8 EnCicla

estación: realizando una solicitud de préstamo de bicicleta o devolviendo una bicicleta previamente prestada en cualquier estación del área metropolitana. En ambos casos, se requiere la intervención de un operador para brindar la atención correspondiente. Si un agente busca un préstamo, ingresa a una cola y espera la asignación de una bicicleta disponible en el inventario. Una vez que recibe una bicicleta, su interacción con el sistema se completa. Por otro lado, cuando un agente llega para devolver una bicicleta, esta se agrega al inventario de bicicletas disponibles en la estación, y el agente abandona el sistema. Mientras tanto, la bicicleta espera a ser emparejada con otro agente interesado en tomar un préstamo de bicicleta.

#### 4.1 Estado del sistema

- $L_{QPS}(t)$ , el número de personas esperando bicicleta en el tiempo  $t$  en la estación Suramericana.
- $L_{QPU}(t)$ , el número de personas esperando bicicleta en el tiempo  $t$  en la estación Campus Nacional.
- $L_{QES}(t)$ , el número de personas esperando a devolver una bicicleta en el tiempo  $t$  en la estación Suramericana.
- $L_{QEU}(t)$ , el número de personas esperando a devolver una bicicleta en el tiempo  $t$  en la estación Campus Nacional.
- $LOS(t)$ , 0 o 1 para indicar si el operador de la estación Suramericana está ocupado o no, respectivamente.

		Low 95% Range	Average Result	High 95% Range
Esperando_Atencion_Sura	Average Queue Size	0.46	0.54	0.63
Esperando_Atencion_Unal	% Queued Less Than Time Limit	53.36	54.42	55.47
Esperando_Atencion_Sura	% Queued Less Than Time Limit	95.72	96.34	96.95
Esperando_Atencion_Unal	Average Queue Size	8.59	8.91	9.23

**Fig. 20** Resultados Modelo

- $LOU(t)$ , 0 o 1 para indicar si el operador de la estación Campus Nacional está ocupado o no, respectivamente.
- $L_{SS}(t)$ , el número de bicicletas disponibles en inventario en la estación Suramericana.
- $L_{SU}(t)$ , el número de bicicletas disponibles en inventario en la estación Campus Nacional.

#### 4.2 Entidades

Las bicicletas y las personas son las entidades principales del sistema. Dado que las personas desempeñan un papel fundamental en el flujo de bicicletas y que la disponibilidad de bicicletas afecta el flujo de personas, es necesario considerar ambas entidades de manera integral. En este sistema, se puede distinguir entre las personas que desean realizar un préstamo y las que desean hacer una devolución. No es necesario identificarlos mediante un atributo adicional, ya que cada tipo de usuario sigue su propio flujo.

#### 4.3 Eventos

- Evento de llegada de una persona solicitando un préstamo de bicicleta (en ambas estaciones).
- Evento de llegada de una persona devolviendo una bicicleta (en ambas estaciones).
- Finalización del servicio de recepción.
- Finalización del servicio de préstamo.

#### 4.4 Actividades

- Tiempo de servicio de recepción de la bicicleta, definido en la Tabla 2.
- Tiempo de servicio de préstamo de la bicicleta, definido en la Tabla 2.
- Tiempo entre llegadas de personas para préstamo de bicicletas (para cada estación), definido en la Tabla 2.
- Tiempo entre llegadas de personas para devolución de bicicletas (para cada estación), definido en la Tabla 2.



**Tabla 2** Distribuciones de la simulación

	Distribución	Parámetro(s)
Llegada persona préstamo Campus Nacional	Exponencial	85.7
Llegada persona préstamo Suramericana	Exponencial	61.52
Llegada personas devolución Campus Nacional	Exponencial	151.8866
Llegada personas devolución Suramericana	Exponencial	69
Servicio de recepción	Weibull	Alpha: 2.84 Beta: 10.32
Servicio de prestamo	Log Normal	Media: 18.79 Std: 8.11

#### 4.5 Medidas de desempeño

Los resultados se pueden consultar en la Figura 20. A continuación se presentan las siguientes medidas de desempeño y sus respectivos intervalos de confianza:

- Número de personas esperando bicicleta en la estación Suramericana en el tiempo  $t$ .
- Número de personas esperando bicicleta en la estación Campus Nacional en el tiempo  $t$ .
- Porcentaje de personas que esperan menos de 3 minutos por una bicicleta en la estación Suramericana.
- Porcentaje de personas que esperan menos de 3 minutos por una bicicleta en la estación Campus Nacional.

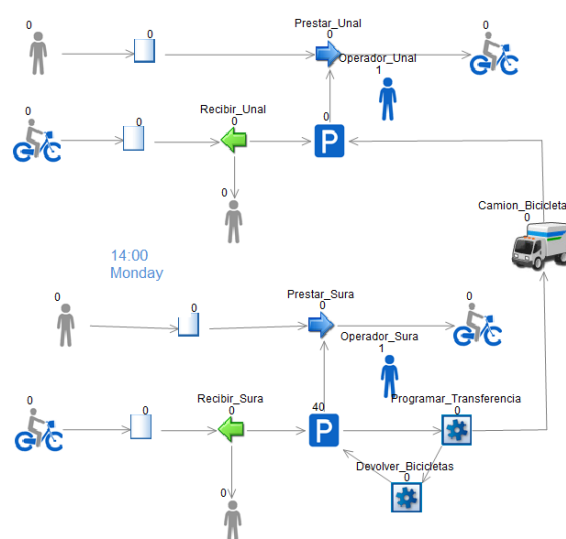
#### 5 Análisis de resultados

La verificación del modelo se lleva a cabo mediante la comparación entre los resultados simulados y los datos observados en la realidad. En este contexto, se observa que el modelo refleja fielmente la vida real, como se mencionó previamente. En la estación Suramericana, se observa una baja incidencia de filas, mientras que en la estación Campus Nacional se registró un promedio de 9 personas en espera, tal y como lo representa el modelo. Esta correspondencia entre los resultados del modelo y la realidad valida su capacidad para capturar y representar de manera precisa los fenómenos y comportamientos del sistema.

La cantidad de corridas realizadas está estrechamente relacionada con el tamaño de muestra requerido para cada variable aleatoria. En este contexto, el tamaño de muestra más grande corresponde al tiempo entre llegadas de personas que solicitan un préstamo de bicicleta, con un valor de 440. Por lo tanto, este valor se selecciona como el mínimo necesario de corridas. No obstante, para aprovechar la capacidad computacional disponible, se opta por realizar 1000 corridas.

Después de analizar el sistema, se ha determinado proponer dos soluciones igualmente efectivas, dejando a discreción del operador (EnCicla) la elección de la opción más conveniente.

		Low 95% Bound	Average Result	High 95% Bound
Esperando_Atencion_Sura	Average Queue Size	1.10	1.25	1.41
Esperando_Atencion_Unal	% Queued Less Than Time Limit	89.31	89.97	90.64
Esperando_Atencion_Sura	% Queued Less Than Time Limit	89.79	90.00	91.02
Esperando_Atencion_Unal	Average Queue Size	1.53	1.67	1.81

**Fig. 21** Resultados Solución 1**Fig. 22** Modelo Optimizado No. 2

La **primera solución** propone estimar la cantidad mínima de bicicletas necesarias al comienzo de cada jornada en cada estación. Para ello, se realizaron varias simulaciones con diferentes cantidades de bicicletas. Tras evaluar estas simulaciones, se determinó que se requieren al menos 18 bicicletas al inicio de la jornada en la estación Suramericana y 30 bicicletas en la estación Campus Nacional. En el sistema actual, esto significa que la estación Suramericana tiene un excedente promedio de 7 bicicletas, mientras que Campus Nacional tiene un déficit promedio de 18 bicicletas. En total, EnCicla debe agregar 11 bicicletas al sistema. Esta solución mantiene la estructura del modelo inicial representado en la Figura 19.

La **segunda solución** implica un cambio estructural en el modelo inicial (consultar Figura 22). En términos generales, se incorpora un camión (requiere 10

		Low 95% Range	Average Result	High 95% Range
Esperando_Atencion_Unial	Average Queue Size	1.54	1.69	1.83
Esperando_Atencion_Sura	Average Queue Size	1.15	1.30	1.46
Esperando_Atencion_Unial	% Queued Less Than Time Limit	89.00	89.70	90.40
Esperando_Atencion_Sura	% Queued Less Than Time Limit	89.31	90.33	91.35

**Fig. 23** Resultados Solución 2

minutos para trasladarse de una estación a otra)<sup>6</sup> encargado de trasladar bicicletas desde la estación Suramericana a la estación Campus Nacional. Al inicio de la simulación, este camión se encarga de transferir 19 bicicletas desde Suramericana a Campus Nacional. Para que se pueda realizar esta transferencia, Suramericana debe tener al menos 33 bicicletas en su inventario. No obstante, esto no es suficiente y Suramericana debe iniciar con 36 bicicletas. Cabe destacar que Campus Nacional comienza con la misma cantidad de bicicletas que en el modelo original.

Los resultados de ambas alternativas se pueden consultar en las Figuras 21 y 23, respectivamente.

## 6 Conclusiones

Tras realizar el estudio en el intervalo de 2 p.m. a 4 p.m. y llevar a cabo la simulación correspondiente, se llegó a la conclusión de que la estación Campus Nacional presenta dificultades en términos de oferta y demanda de bicicletas.

Para abordar esta problemática, se propusieron dos alternativas que permiten reducir significativamente las colas, llegando incluso a su eliminación total. Además, estas alternativas logran reducir el tiempo de espera de un usuario por bicicleta a menos de 3 minutos en el 90% de los casos.

Una de las alternativas, propone la mínima cantidad de bicicletas que debe tener cada estación al inicio de la jornada, para que en ambas, se cumpla con los objetivos establecidos. Por otro lado, basandose en los resultados de la alternativa anterior, se plantea una nueva que solo busca garantizar un mínimo de bicicletas en Suramericana y al inicio de la jornada transportar parte de ellas a Campus Nacional.

En futuras investigaciones, sería especialmente interesante implementar ambas soluciones y evaluar el impacto de los cambios propuestos en el funcionamiento operativo de las estaciones. Sería relevante investigar cómo estos cambios podrían generar mejoras o desafíos adicionales tanto en las estaciones actuales como en otras estaciones. Además, resulta crucial analizar cuál de las dos alternativas es financieramente más viable

<sup>6</sup> Basado en el promedio estimado proporcionado por Google Maps

y brinda mayor comodidad dentro de la estructuración del sistema actual.

## Contribuciones

Cada sección del documento fue revisada y planificada por todos los integrantes del grupo. Además, la recolección de datos manual se realizó por turnos entre cada uno de los miembros del equipo. El modelo en SIMUL8 se llevó a cabo de manera conjunta por todos los integrantes del grupo.

Andrés Felipe Callejas Ruiz

- Descripción del proceso para ajustar las distribuciones (Datos de entrada).
- Descripción del modelo de simulación.
- Análisis de resultados.
- Contribución al código para la obtención de datos de la página web de EnCicla.

Daniel Castillo Giraldo

- Optimización de los modelos.
- Redacción del proceso de recolección de datos de entrada.
- Revisión y edición de contenidos, además de adaptación a LaTeX.
- Despliegue del servidor para realizar la obtención de datos 24/7. Extracción de los datos y preprocesamiento de los mismos.

Orlando Esteban Del Río Cantillo

- Definición del problema.
- Análisis estadístico en R y ajuste de distribuciones.
- Análisis gráfico de los resultados de la simulación.
- Redacción de las conclusiones.

Valentina Arias Quiroz

- Redacción y formulación del problema.
- Interpretación de los resultados.
- Encuesta a Operador de EnCicla.
- Resumen.

## Recursos

El informe incluye un repositorio adjunto que se encuentra disponible en [5]. Este repositorio contiene lo siguiente:

- Modelos del sistema en SIMUL8.
- Datasets utilizados.
- Código para preprocesamiento de datos.
- Código para obtener la cantidad de bicicletas de la página de EnCicla.

Además, se utilizó la aplicación web DataRizer [4] para la recolección de datos.

## Referencias

1. Universidad Nacional de Colombia, “Cifras unal sede medellín.” 2022.
2. Metro de Medellín, “Memoria de sostenibilidad 2022,” 2022.
3. W. Mendenhall and R. Beaver, *Introducción a la probabilidad y estadística*, 2010.
4. D. Castillo, “Datarizer,” <https://datarizer.vercel.app/>, 2023.
5. A. F. Callejas, D. Castillo, O. E. del Rio, and V. Arias, “Simulación encicla,” [https://github.com/danielcgirardo/encicla\\_stats](https://github.com/danielcgirardo/encicla_stats).