




Diagnosis and determination of the dynamic load capacity of an archaeological site through discrete event simulation

Darwin Alcántara Vicente, Eng¹, Emilio Díaz Mori, MEng², Miguel Fernández Pérez, PhD³
^{1,2,3}Group of Applied Operations Research, Department of Engineering, Pontifical Catholic University of Peru,
Lima, Peru, darwin.alcantara@pucp.edu.pe, ediazm@pucp.edu.pe, mfernandezp@pucp.edu.pe

Abstract– The present study analyzes the dynamic load capacity of an archaeological complex in Peru through the simulation of discrete events. Tourist flow throughout the day was modelled, considering the different routes and means of transport available, such as cable cars and central stations. The analysis identified critical congestion points in key areas of the route, mainly in the access and exit zones of the complex, which can affect visitor experience and operational efficiency. The results highlight the importance of optimal resource management, including infrastructure and timetables, to improve the distribution of tourist flow. It is recommended to evaluate strategies to optimize the capacity of the transport system and to carry out additional studies to ensure a balance between heritage conservation and tourism growth.

Keywords– Discrete event simulation; Dynamic load capacity; Management of archaeological complexes.

Diagnóstico y determinación de la capacidad de carga dinámica de un recinto arqueológico mediante simulación de eventos discretos

Darwin Alcántara Vicente, Eng¹, Emilio Díaz Mori, MEng², Miguel Fernández Pérez, PhD³
^{1,2,3}Group of Applied Operations Research, Department of Engineering, Pontifical Catholic University of Peru,
Lima, Peru, darwin.alcantara@pucp.edu.pe, ediazm@pucp.edu.pe, mfernandezp@pucp.edu.pe

Resumen– *El presente estudio analiza la capacidad de carga dinámica de un recinto arqueológico en Perú mediante la simulación de eventos discretos. Se modeló el flujo de turistas a lo largo del día considerando las distintas rutas y medios de transporte disponibles, como teleféricos y estaciones centrales. El análisis permitió identificar puntos críticos de congestión en áreas clave del recorrido, principalmente en las zonas de acceso y salida del recinto, lo que puede afectar la experiencia del visitante y la eficiencia operativa. Los resultados destacan la importancia de una gestión adecuada de los recursos, incluyendo la infraestructura y la programación de horarios, para mejorar la distribución del flujo de turistas. Se recomienda evaluar estrategias para optimizar el sistema de transporte y realizar estudios adicionales que permitan garantizar un equilibrio entre la conservación del patrimonio y el crecimiento del turismo.*

Palabras clave– *Simulación de eventos discretos; Capacidad de carga dinámica; Gestión de complejos arqueológicos.*

I. ANTECEDENTES

En el Perú, el sector turismo significa cerca del 2.9% de su PBI anual y es un gran generador de empleos; y de acuerdo con el Ministerio de Comercio Exterior y Turismo, este sector emplea a cerca de 1.3 millones de personas [1]. Esto indica que el turismo es clave para la generación del progreso económico y trabajo en el país. Similarmente, tanto solo en el año 2024, el Perú recibió por lo menos a 2.9 millones de turistas de diversos países, esto significa un aumento en más del 30% respecto a la misma cantidad del año 2023 y una recuperación del 74% de la cantidad registradas en los años pre-pandemia [2].

Si bien el turismo en el Perú ha quedado relevado en comparación frente a otros países de la región, como Colombia o Chile, existe una urgente necesidad por mejorar e incrementar la infraestructura actual, ya que la ausencia de estas significa una oportunidad desaprovechada para atender a una mayor cantidad de visitantes mejorando la oferta turística actual. Actualmente, se encuentra en curso múltiples proyectos de inversión para la infraestructura en varios complejos arqueológicos en el país.

Esta necesidad urgente plantea nuevos desafíos, como la determinación de la capacidad de carga turística y el establecimiento de aforos de visita por unidad de tiempo. Estos factores son fundamentales para definir criterios de control que permitan regular de manera eficiente el flujo de turistas en los recursos patrimoniales [3]. Así, la capacidad de carga dinámica es el número máximo de visitantes que puede albergar un complejo arqueológico simultáneamente; y su importancia radica en las proyecciones de aforo para la programación de

horarios y la de demanda satisfecha. Empíricamente, se podría asumir este valor como el aforo de un recinto (capacidad de carga física); sin embargo, el valor agregado de la carga dinámica es que se pueda permitir un flujo óptimo de personas asegurando la mayor utilización de la edificación de acuerdo con la gestión de la infraestructura. Para este fin, se pretende realizar la simulación de eventos discretos de un recinto arqueológico que será construido en los próximos años en el Perú, en una importante ciudad y que constará de dos teleféricos de acceso, dos estaciones centrales de llegada a los teleféricos y con cuatro diferentes recorridos posibles que los visitantes podrán realizar. En el presente estudio se llevará a cabo un diagnóstico a la demanda satisfecha, el flujo horario y capacidad de carga dinámica de un recinto arqueológico.

II. METODOLOGÍA

La metodología empleada en el presente estudio consta de los siguientes pasos:

- Recolección de información detallada sobre el recinto arqueológico en cada etapa del recorrido turístico. Se recopilaban datos clave como distancias, tiempos de visita, número de personas por guía turístico y capacidad de los teleféricos, entre otros. Esta información se obtuvo para cada sección del recinto, incluyendo: dos estaciones centrales de embarque para pasajeros que se trasladan en bus hasta las estaciones de teleférico, dos estaciones de ingreso a los teleféricos, dos estaciones de llegada, dos teleféricos de acceso al recinto arqueológico y trece sectores de parada dentro de la zona.
- Análisis de la información recolectada para estimar la proyección anual y diaria de visitantes al recinto.
- Construcción del modelo de simulación basado en el diseño planificado del recinto, incluyendo las estaciones de acceso y los flujos turísticos previstos.
- Evaluación de los resultados, comparando la demanda atendida con la proyección mínima de turistas requerida para la rentabilidad del proyecto.
- Identificación de cuellos de botella en el recinto con el objetivo de proponer mejoras que optimicen su capacidad.
- Determinación de indicadores clave, como la cantidad final de visitantes atendidos, el flujo horario y la capacidad de carga dinámica.

III. CRITERIOS DE ANÁLISIS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE CARGA DINÁMICA

Para la aplicación del modelo de simulación de la demanda en el recinto, se han establecido cuatro puntos críticos que se orientan al manejo de visitantes en los diferentes lugares a recorrer. Estos son: (1) los datos históricos de la demanda de complejos arqueológicos similares; (2) la capacidad de manejo en cada edificación del complejo turístico; (3) las ofertas turísticas propuestas y validadas por los diferentes actores para realizar las visitas en grupo de 15 personas; y (4) determinar si la gestión del complejo es conveniente para las personas, el área protegida y para la experiencia de cada visitante.

Como se menciona en la Referencia [4], la capacidad de carga simultánea está determinada por la cantidad de grupos que pueden permanecer en un sitio ecoturístico al mismo tiempo, minimizando los encuentros entre visitantes y mejorando su experiencia. Para gestionar eficientemente el alto flujo de turistas previsto, será fundamental una administración organizada, el compromiso de los prestadores de servicios, la implementación de una infraestructura adecuada y la sensibilización de los visitantes para garantizar la conservación del entorno y del patrimonio.

Para el cálculo de la carga dinámica se tomarán en cuenta fundamentalmente los siguientes datos de entrada: la demanda de visitantes, la gestión de cada edificación y el modelamiento del día de mayor afluencia.

IV. DESCRIPCIÓN DEL RECINTO TURÍSTICO EN ESTUDIO

El modelo de simulación abarca desde la llegada de los visitantes a las 6:00 horas a las estaciones centrales 1 y 2, en donde podrán adquirir sus boletos para tomar los buses hacia las estaciones 3 y 4. Se establece una programación de salidas de buses, con una capacidad predeterminada con los actores del sector turismo.

En las estaciones 3 y 4 se embarcan en los teleféricos hacia las estaciones 5 y 6 de ingreso al recinto arqueológico. Las estaciones 3, 4, 5 y 6 tiene su propia gestión de colas, distribución de áreas para que cada persona pueda pasar por los torniquetes con sus respectivos boletos y subir a los teleféricos.

En las estaciones 5 y 6, el flujo de turistas desembarcará de los teleféricos e iniciarán sus respectivos recorridos dentro del recinto arqueológico, de acuerdo, a la elección de los turistas según las cuatro ofertas propuestas. Adicionalmente, existen tres flujos adicionales para caminantes, esto es, una alternativa en la que se ingresa caminando durante varios días.

Una vez iniciado el recorrido dentro del recinto, cada grupo conformado por 15 personas realizarán el recorrido elegido y posteriormente volverán a embarcar en los teleféricos para el proceso de salida. Esto sería de manera inversa a la explicada en los anteriores párrafos.

V. ANÁLISIS DE DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELO DE SIMULACIÓN

La proyección de la demanda efectiva a atender en el recinto arqueológico se realizó a partir de las estimaciones de visitas turísticas publicadas en los estudios básicos y en el perfil del proyecto registrado en el Banco de Inversiones de Invierte.pe. En la Tabla I se muestra el detalle por año. El modelo de simulación deberá ayudar a determinar si el diseño actual es capaz de atender toda la demanda o, en caso contrario, qué edificaciones son los cuellos de botella para impedirlo.

TABLA I
Demanda efectiva por atender

Año	Turista Nacional	Turista Extranjero	Total
1	246,100	979,782	1,225,882
2	249,921	1,022,304	1,272,224
3	253,741	1,064,826	1,318,566
4	257,561	1,107,347	1,364,909
5	261,381	1,149,869	1,411,251
6	265,202	1,192,391	1,457,593
7	269,022	1,234,913	1,503,935
8	272,842	1,277,435	1,550,277
9	276,663	1,319,956	1,596,619
10	280,483	1,362,478	1,642,961
11	284,303	1,405,000	1,689,303
12	288,123	1,447,522	1,735,645
13	291,944	1,490,044	1,781,987
14	295,764	1,532,566	1,828,329
15	299,584	1,575,087	1,874,671
16	303,404	1,617,609	1,921,014
17	307,225	1,660,131	1,967,356
18	311,045	1,702,653	2,013,698
19	314,865	1,745,175	2,060,040
20	318,685	1,787,696	2,106,382
21	322,506	1,830,218	2,152,724

A continuación, se desagrega el flujo de visitantes diario en cada ruta ofertada por la entidad a cargo del monumento y validado por los actores del sector turismo en el destino. Cabe resaltar que esto es la demanda actual; y mediante el modelo de simulación se determinará la cantidad de demanda satisfecha en cuanto a turistas que lograron realizar la visita.

TABLA II
Flujo de visitantes

Recorridos	Ruta	Visitantes
OFERTA 1	Recorrido Base	1324
	Variación 1	187
	Variación 2	93
	Variación 3	93
OFERTA 2	Recorrido Base	1431
	Variación 1	199
	Variación 2	99
	Variación 3	99
OFERTA 3	Recorrido Base	883
	Variación 1	124
	Variación 2	62
	Variación 3	62
OFERTA 4	Recorrido Base	2147
	Variación 1	298
	Variación 2	149
	Variación 3	149
CAMINANTES	Variación 1	544
	Variación 2	516
	Variación 3	363
Total		8822

Para las estaciones centrales, se tiene en cuenta los siguientes datos:

TABLA III
Datos de entrada para las estaciones centrales

Estación central	Datos entrada	
	Intervalo	Frecuencia
1	06:00 – 07:00	11 minutos
	07:00 – 08:30	15 minutos
	08:30 – en adelante	11 minutos
2	06:00 – en adelante	10 minutos

Cabe resaltar que estas políticas se establecieron entre todos los actores del sector turismo y considerando la capacidad, que son políticas establecidas y propuestas por la entidad gubernamental y validada por los actores del sector turismo. Así mismo, como este flujo de turistas se da a través de buses, los turistas tomarán inmediatamente el teleférico ni bien desembarquen de este transporte; los intervalos de salidas de los buses deben ser la misma que la de los intervalos de los teleféricos a fin de evitar largas colas y tiempos de espera. El intervalo de salida de los teleféricos es un dato de entrada con que se cuenta debido a que se conoce la distancia, la velocidad del teleférico y tiempo de embarque.

Posteriormente, los datos se utilizarán para definir las llegadas de las entidades (turistas) al modelo de simulación.

Este estudio se aplicará para el día pico de la semana (domingo) donde se recibe el 23.6% de la demanda semanal.

Se tiene los siguientes intervalos de llegada de los visitantes al recinto arqueológico, de acuerdo a la oferta turística que deseen realizar.

TABLA IV
Intervalos de llegada de los turistas

Recorridos	Ruta	Inicio (min)	Fin (min)	Intervalo entre llegadas (min)	
OFERTA 1	Recorrido Base	195	255	0.10068	
		255	315	0.11326	
		315	375	0.30204	
	Variación 1	0	57	0.87282	
		57	114	1.22195	
		114	171	2.34992	
		171	228	2.54574	
		228	285	3.05489	
		285	342	6.10979	
	Variación 2	0	62	1.79614	
		62	124	2.88945	
		124	186	3.32287	
		186	248	4.74695	
		248	310	9.49391	
		310	372	13.74082	
	Variación 3	0	70	1.00043	
		70	140	3.0013	
		140	210	6.0026	
	OFERTA 2	Recorrido Base	165	195	0.05989
			195	225	0.04192
			225	255	0.13975
		Variación 1	0	47	0.59059
			47	94	0.67496
			94	141	1.18118
141			188	4.72473	
Variación 2		0	56	1.40736	
		56	112	1.60841	
		112	168	2.25178	
Variación 3		0	20	0.20105	
OFERTA 3		Recorrido Base	195	255	0.12356
	255		315	0.15102	
	Variación 1	0	59	1.18578	
		59	118	1.58104	
		118	177	2.37156	
		177	236	5.92891	
	Variación 2	0	59	2.10805	
		59	118	2.71036	
		118	177	6.32417	
		177	236	18.97252	
	Variación 3	0	47	0.83965	

	Variación 3	47	94	7.55685
OFERTA 4	Recorrido Base	165	205	0.07453
		205	245	0.0414
		245	285	0.07453
		285	325	0.37268
	Variación 1	0	51	0.48827
		51	102	0.56964
		102	153	0.94941
		153	204	1.70894
		204	255	3.41789
	Variación 2	255	306	8.54472
		0	49	0.93824
		49	98	1.09461
		98	147	1.64192
	Variación 3	147	196	3.28385
		196	245	6.56771
0		52	0.49784	
CAMINANTES	Variación 1	50	135	0.16
	Variación 2	60	129	0.13
	Variación 3	50	104	0.15

Así mismo, para cada sector dentro del recinto arqueológico se consideró un aforo como la capacidad para albergar a turistas.

Tabla V
Aforo de los sectores del recinto arqueológico

Sectores	Capacidad
Sector I	288
Sector C	174
Sector D	158
Sector E	166
Sector F	38
Sector A	107
Sector J	76
Sector K	123
Sector B1	104
Sector B2	88
Sector H	81
Sector G	200
Sector L	200

Análogamente, en cada tramo del recinto arqueológico que conectan los sectores entre sí, también poseen un aforo que se traduce en la capacidad para albergar turistas. A continuación, los detalles:

Tabla VI
Aforo de los caminos que conectan los sectores del recinto arqueológico

Origen	Destino	Capacidad
Estación 6	Sector I	309
Sector I	Sector L	190
Sector L	Sector C	28
Sector C	Sector D	49
Sector D	Sector E	71
Sector E	Sector F	141
Sector F	Sector I	129
Sector I	Sector G	498
Sector G	Sector K	128
Sector K	Sector J	128
Sector J	Sector G	377
Andenes	Sector G	603
Sector C	Sector H	357
Sector C	Sector A	130
Sector A	Sector B1	23
Sector B1	Sector B2	52
Sector B2	Sector C	98
Estación 5	Sector A	1291

Así mismo, se cuenta con los siguientes datos: capacidad de cada teleférico, igual a 100 personas; capacidad de los buses que conectan las estaciones centrales hasta el teleférico, igual a 25 personas; y el tamaño de grupo de turistas, igual a 15.

VI. DATOS DE ENTRADA PARA EL SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Se cuenta con los siguientes datos para ingresar al software de simulación Arena:

TABLA VII
Datos de entrada del software de simulación

Parámetros de entrada	Descripción
Entidad	Las entidades serán los visitantes que entran al recinto arqueológico mediante cualquiera de sus recorridos.
Atributo	Tipos de ruta de cada oferta, tamaño de grupo, recorrido (variaciones), tipo de turista, si se encuentran entrando o saliendo del recinto.
Recursos	Sectores del recinto arqueológico, las boleterías de las estaciones centrales, los teleféricos, las zonas de embarque para los buses, los torniquetes en las estaciones de teleféricos.
Colas	Las colas para ingresar a las estaciones centrales, del embarque hacia los buses, a los sectores, a los teleféricos, al ingresar a un camino para trasladarse a otro lugar (se considera capacidad de caminos), entre otros. La disciplina a seguir para estos casos es FIFO (primero en llegar, primero en salir).
Variables globales	Se consideran la capacidad de buses (25), de transporte por cable (100), turistas agrupados (de 15 para los recorridos normales y 3 turistas para el flujo de caminantes).
Secuencia	Los diferentes recorridos para los visitantes cuentan con cuatro rutas distintas cada una. Cada una de ellas, siguen una secuencia de sectores que los turistas deben visitar y que se encuentra establecidos por los actores del sector turismo.
Tasa de llegada	Cada una de las rutas mencionadas anteriormente, posee un flujo de llegada para cada turista obtenido a partir del modelamiento de la demanda. En el software se inserta un intervalo de llegada entre cada persona dependiendo la naturaleza del tipo de visitante.
Transporte	Se considera como transporte los buses (caravanas desde las estaciones centrales hacia los teleféricos) y los teleféricos de arribo al recinto arqueológico.

VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Fig. 1 se ilustra el diseño de la animación del modelo de simulación para el recinto arqueológico descrito.

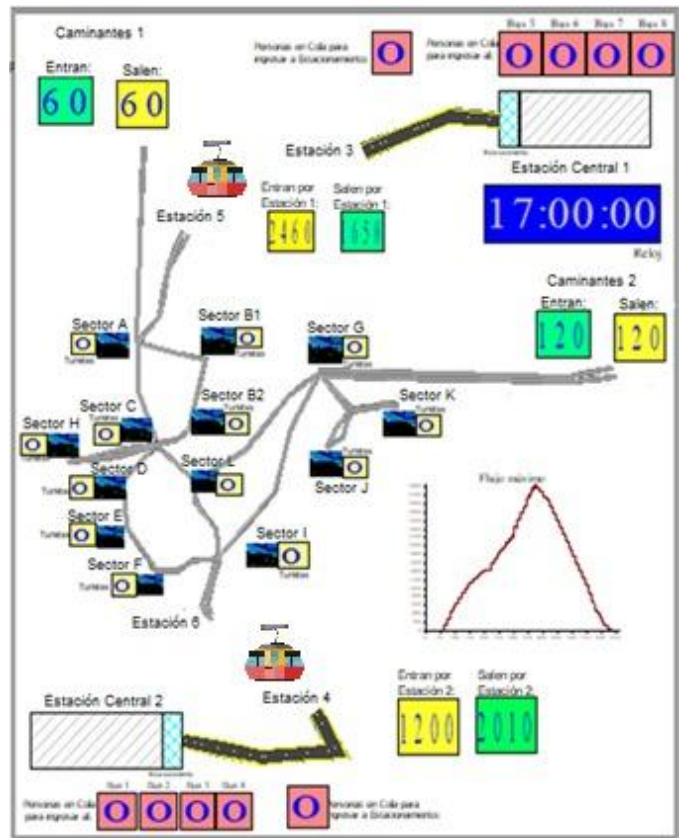


Fig. 1 Diseño de la animación del modelo de simulación del recinto arqueológico

Al concluir la ejecución del modelo de simulación, se observa que se animaron indicadores de atención de turistas a través de las estaciones centrales. De igual manera, cada sector también presenta animación de indicadores, en donde se observa la cantidad de turistas presentes en el tiempo. De igual manera, se observa un gráfico del flujo (ingreso menos salidas) de turistas en el tiempo. El mayor valor del flujo de turistas determina la capacidad de carga dinámica del recinto arqueológico; este valor depende de la gestión del recorrido de turistas, la capacidad de cada sector y de cada camino, los tiempos de visita y el horario de funcionamiento. Este valor debe tomarse como la máxima cantidad de turistas que puede albergar en simultáneo todo el recinto arqueológico. En la Tabla VIII se presenta los resultados de la simulación.

TABLA VIII
Resultados del modelo de simulación

Cantidad de turistas que culminan el recorrido	3840
Capacidad de carga dinámica	3405
Tiempo inicio (minuto)	53.500
Tiempo fin (minuto)	631.740
Tiempo total servicio (horas)	9.637

Según los resultados, la cantidad de turistas que culminan el recorrido es de 3840, este valor depende de la gestión del

recorrido de turistas. Los resultados indican que el primer turista arriba al recinto arqueológico al minuto 53.5 de la simulación, esto es, a las 6:53 a.m. Por último, la salida del último turista del recinto arqueológico se da en el minuto 631.74 de la simulación, esto es, a las 4:31 p.m. La Fig. 2 muestra la evolución del flujo de turistas durante el funcionamiento del recinto arqueológico.



Fig. 2 Flujo de turistas

En esta figura se observa que en el minuto 379 de la simulación (12:19 p.m.) el recinto arqueológico alcanza la mayor cantidad de turistas a lo largo del día, cuyo valor es de 3405 personas. Este valor es la capacidad de carga dinámica. Note que, si se incrementa este valor, la atención finalizaría después de la hora de cierre programado para estas edificaciones de acuerdo con las limitantes establecidas. Al cierre de la hora programada, no debe permanecer ninguna persona dentro de los sectores o teleféricos.

El modelo de simulación permite analizar las colas entre las estaciones centrales y de acceso a los teleféricos. Así mismo, como en estas edificaciones se tiene que embarcar vía bus hacia los teleféricos, el sistema también está diseñado para que muestre los resultados de las colas para que se tomen medidas preventivas para instantes de aglomeración de turistas. Uno de los resultados concluye que se presenta un pico máximo en la estación central para la boletería Estación Central 2 con 745 personas para el minuto 216 de la simulación (9:36 a.m.). Este instante sugiere para los actores del sector turismo que deben tomar medidas preventivas para evitar que la edificación colapse frente al recibimiento de esa cantidad de turistas. Una medida útil es la implementación de separadores de filas para una mejor distribución de los visitantes mientras esperan su turno para la compra de boletos o implementar una mayor cantidad de buses para acortar la cola de espera o la creación de un sistema de pagos online.

El modelo de simulación también detecta otra cola importante con 165 personas para el minuto 551 de la simulación (5:11 p.m.) en la Estación 6 del teleférico para abandonar el recinto arqueológico. Esto sugiere a los actores del sector turismo tomar medidas preventivas para evitar el colapso de la edificación o una ampliación del área total de la estación. Como es natural, este instante se da en el momento en que la mayoría de los visitantes se están retirando del recinto para

proceder a tomar el teleférico y los buses hacia las estaciones centrales.

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo de simulación ha permitido diagnosticar el flujo de turistas y la capacidad de atención de un recinto arqueológico en Perú. Los resultados indican que es posible atender hasta 3840 visitantes por día considerando todas las ofertas turísticas. Sin embargo, se identificaron posibles puntos de congestión. En la boletería y caravana en la Estación Central 2, se prevé un colapso con 745 personas debido a la llegada masiva de turistas en horas de la mañana. Asimismo, en la Estación 6 del teleférico, se estima un colapso con 165 personas por la concentración de turistas en la salida del recinto. Estos cuellos de botella podrían afectar la experiencia de los visitantes y la eficiencia operativa del recinto.

Se recomienda ampliar el alcance del estudio, ya que el análisis realizado corresponde únicamente a la etapa de diagnóstico. Es necesario desarrollar estudios adicionales para optimizar los recursos, como estaciones de turistas y sectores con el fin de mejorar la distribución del flujo de visitantes.

También se sugiere evaluar la cantidad óptima de transportes, tanto buses como teleféricos, que permitan maximizar la capacidad de atención diaria sin generar congestión en puntos críticos. Adicionalmente, se podría evaluar el impacto de aquellos que usen energías renovables, implementando paralelamente una tecnología de monitoreo al flujo de personas y de vehículos en tiempo real.

Finalmente, se recomienda realizar un análisis financiero para determinar la viabilidad económica del proyecto, considerando un umbral mínimo de visitantes atendidos por día que garantice su rentabilidad. Estas medidas permitirán mejorar la gestión del recinto arqueológico y asegurar una experiencia más eficiente y satisfactoria para los turistas.

REFERENCES

- [1] Ministerio de Comercio Exterior y Turismo, En el 2024 el sector turismo representaría el 2.9 % del PBI y generaría 1.3 millones de empleos. <https://www.gob.pe/institucion/mincetur/noticias/1042377-ministra-desilu-leon-en-el-2024-el-sector-turismo-representaria-el-2-9-del-pbi-y-generaria-1-3-millones-de-empleos>
- [2] Ministerio de Comercio Exterior y Turismo, Más de 2,9 millones de turistas internacionales visitaron el Perú entre enero y noviembre del 2024. <https://www.gob.pe/institucion/mincetur/noticias/1076431-mincetur-mas-de-2-9-millones-de-turistas-internacionales-visitaron-el-peru-entre-enero-y-noviembre-del-2024>
- [3] M. G. Hernández, M. de la Calle Vaquero, M. D. C. M. García, “Capacidad de carga turística y espacios patrimoniales. Aproximación a la estimación de la capacidad de carga del conjunto arqueológico de Carmona (Sevilla, España)”, *Boletín de la Asociación de Geógrafos españoles*, no. 57, 2011.
- [4] Parques Nacionales Naturales de Colombia, Subdirección Técnica, Guía Metodológica para el monitoreo impactos del ecoturismo y determinar capacidad de carga aceptable en la Unidad de Parques Nacionales Naturales de Colombia. <https://old.parquesnacionales.gov.co/portal/wp-content/uploads/2021/12/metodologia-para-el-monitoreo-de-impactos-del-ecoturismo-y-determinacion-de-la-capacidad-de-carga-acceptable.pdf>