

Optimización de Circuitos Turísticos Multi-Regionales mediante Algoritmo Simulated Annealing: Un Enfoque para Maximizar la Diversidad de Experiencias Turísticas

CLIVER DANIEL MAMAMNI HUATTA
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
danielmamani196@gmail.com

Resumen

Este estudio se centró en desarrollar un sistema de optimización para la creación de circuitos turísticos multi-regionales que conectaran diferentes destinos arqueológicos y culturales del Perú. El objetivo principal fue minimizar las distancias de recorrido mientras se maximizaba la diversidad de experiencias turísticas ofrecidas. Se utilizaron datos geospaciales del Inventario Nacional de Recursos Turísticos del Ministerio de Comercio Exterior y Turismo (MINCETUR) que incluían variables como latitud, longitud, categoría, tipo de categoría y región administrativa. La metodología aplicada se basó en el algoritmo de Simulated Annealing para resolver el problema de optimización combinatoria, considerando restricciones de tiempo, presupuesto y logística de transporte. Los resultados mostraron que el algoritmo logró reducir en promedio un 35 % la distancia total de recorrido comparado con rutas tradicionales, mientras incrementó en un 40 % la diversidad de categorías turísticas visitadas. Se concluyó que la implementación de técnicas de optimización metaheurística representaba una herramienta efectiva para el diseño de circuitos turísticos eficientes que mejoraban la experiencia del visitante y optimizaban los recursos logísticos.

Palabras clave: Optimización turística, Simulated Annealing, circuitos multi-regionales, diversidad de experiencias, metaheurística

1. Introducción

El turismo constituyó uno de los sectores económicos más importantes a nivel mundial, representando aproximadamente el 10 % del PIB global según la Organización Mundial del Turismo [1]. En países con rica diversidad cultural y geográfica como Perú, la planificación eficiente de rutas turísticas se convirtió en un factor crítico para maximizar la satisfacción del visitante y optimizar los recursos disponibles [2]. El problema de la optimización de circuitos turísticos multi-regionales presentaba desafíos particulares debido a la necesidad de balancear múltiples objetivos: minimizar tiempos y costos de desplazamiento, maximizar la diversidad de experiencias, y considerar restricciones logísticas y presupuestarias [3].

Las investigaciones previas habían abordado el problema de optimización de rutas turísticas principalmente desde perspectivas unicriterio, enfocándose únicamente en la minimización de distancias o tiempos de viaje [4]. Sin embargo, estudios recientes identificaron la importancia de considerar la diversidad de experiencias como un factor determinante en la satisfacción turística [5]. La aplicación de algoritmos metaheurísticos, particularmente Simulated Annealing, había demostrado efectividad en problemas de optimización combinatoria similares al diseño de rutas turísticas [6].

A pesar de los avances en el campo, existía una limitación significativa en cuanto a metodologías que integraran simultáneamente la optimización de distancias con la maximización de diversidad temática en circuitos multi-regionales. Esta investigación se justificó por la necesidad de desarrollar herramientas computacionales que permitieran a operadores turísticos y planificadores diseñar rutas más eficientes y atractivas para los visitantes [7].

El objetivo principal de este trabajo fue desarrollar e implementar un algoritmo de Simulated Annealing para optimizar circuitos turísticos multi-regionales que minimizaran la distancia total de recorrido mientras maximizaran la diversidad de categorías turísticas visitadas, considerando restricciones de tiempo y presupuesto.

2. Marco Teórico

La optimización de rutas turísticas constituyó un problema complejo que pertenecía a la familia de problemas de Traveling Salesman Problem (TSP) con múltiples objetivos [8]. Este tipo de problemas se caracterizaban por la necesidad de encontrar la secuencia óptima de visitas a un conjunto de destinos, considerando restricciones específicas del dominio turístico [9]. A diferencia del TSP clásico, la optimización turística debía incorporar factores como la diversidad de experiencias, preferencias del visitante, y restricciones temporales [10].

Simulated Annealing era una técnica de optimización metaheurística inspirada en el

proceso de recocido en metalurgia [11]. El algoritmo funcionaba mediante la exploración del espacio de soluciones, aceptando tanto mejoras como deterioros controlados según una función de probabilidad que decrecía con el tiempo, simulando el enfriamiento gradual del sistema [12]. La función de aceptación se definía como:

$$P(\Delta E, T) = \exp(-\Delta E/T) \quad (1)$$

donde ΔE representaba el cambio en el valor de la función objetivo y T la temperatura actual del sistema [13].

La diversidad turística se podía cuantificar mediante el Índice de Shannon-Weaver adaptado para categorías turísticas [14]:

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \times \ln(p_i) \quad (2)$$

donde p_i representaba la proporción de sitios de la categoría i en el circuito total [15]. Este índice permitía evaluar qué tan equilibrada era la distribución de diferentes tipos de experiencias turísticas en una ruta determinada.

Para el cálculo de distancias entre puntos geográficos se utilizó la fórmula de Haversine [16]:

$$d = 2r \times \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta \phi}{2} \right) + \cos(\phi_1) \times \cos(\phi_2) \times \sin^2 \left(\frac{\Delta \lambda}{2} \right)} \right) \quad (3)$$

donde r era el radio terrestre, ϕ representaba la latitud y λ la longitud de los puntos [17]. Esta fórmula proporcionaba distancias ortodrómicas que aproximaban adecuadamente las distancias reales para aplicaciones turísticas.

La función objetivo combinada para la optimización de circuitos turísticos se definió como [18]:

$$F = \alpha \times \frac{D_{total}}{D_{max}} + \beta \times \left(1 - \frac{H}{H_{max}} \right) \quad (4)$$

donde D_{total} era la distancia total del circuito, H era el índice de diversidad, D_{max} y H_{max} eran valores de normalización, y α y β eran pesos que balanceaban ambos objetivos [19].

3. Metodología

El estudio se desarrolló utilizando el conjunto de datos del Inventario Nacional de Recursos Turísticos disponible en el portal de Datos Abiertos del Gobierno Peruano (<https://datosabiertos.gob.pe/dataset/inventario-nacional-de-recursos-tur%C3%ADsticos/resource/225aff-46a1-aa32-2069e875b040>) [20]. Este dataset contenía información oficial y actualizada

de sitios turísticos del Perú mantenida por el Ministerio de Comercio Exterior y Turismo (MINCETUR).

Los datos incluyeron 2,847 registros de destinos turísticos distribuidos en las 25 regiones del país, con variables principales: coordenadas geográficas (LATITUD, LONGITUD), categoría turística (CATEGORÍA), subcategoría específica (TIPO DE CATEGORÍA), región administrativa (REGIÓN), y estado de conservación. El formato original del dataset era CSV con codificación UTF-8.

El preprocesamiento de datos incluyó la eliminación de registros con coordenadas geográficas faltantes o incorrectas (fuera del territorio peruano), resultando en 2,634 sitios válidos para el análisis. Se realizó una estandarización de las categorías turísticas siguiendo la clasificación oficial de MINCETUR en ocho grupos principales: Sitios Arqueológicos, Sitios Naturales, Manifestaciones Culturales, Folclore, Realizaciones Técnicas, Científicas y Artísticas Contemporáneas, Acontecimientos Programados, y Servicios Turísticos.

Las coordenadas geográficas fueron validadas mediante filtros que verificaron: (a) latitud entre -18.5° y 0° (límites territoriales de Perú), (b) longitud entre -81.5° y -68.5° , y (c) coherencia entre coordenadas y región administrativa declarada. Se aplicó geocodificación inversa para validar la correspondencia entre coordenadas y ubicación geográfica reportada.

La implementación del algoritmo Simulated Annealing siguió los siguientes parámetros optimizados mediante pruebas preliminares: temperatura inicial $T_0 = 1000$, temperatura final $T_f = 0,01$, factor de enfriamiento $\alpha = 0,95$, y número máximo de iteraciones por temperatura = 100. La función objetivo combinó la minimización de distancia total (peso $\alpha = 0,6$) con la maximización de diversidad de categorías (peso $\beta = 0,4$).

El proceso de optimización consideró restricciones específicas del contexto turístico peruano: tiempo máximo de circuito de 14 días (duración promedio de tours multi-regionales), presupuesto de transporte basado en distancias terrestres utilizando costos promedio del transporte interprovincial, y un mínimo de 3 regiones diferentes por circuito para garantizar la característica multi-regional. Se implementó una función de penalización en la función objetivo para circuitos que violaran estas restricciones.

El cálculo de tiempos de viaje consideró velocidades promedio diferenciadas por tipo de carretera: autopistas (80 km/h), carreteras asfaltadas (60 km/h), y carreteras afirmadas (40 km/h), basándose en la clasificación vial del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú.

La evaluación de resultados se realizó mediante tres métricas principales: distancia total del circuito (km), índice de diversidad de Shannon-Weaver, y tiempo estimado de recorrido (días). Se compararon los resultados del algoritmo propuesto con rutas generadas aleatoriamente y con circuitos turísticos comerciales existentes obtenidos de operadores turísticos locales

| TABLA 1: MÉTRICAS DE EVALUACIÓN | | | | |
|---------------------------------|---|--|----------------|-----------|
| Métrica | Descripción | | Rango/Unidad | Objetivo |
| Distancia Total (km) | Suma de distancias euclidianas entre destinos consecutivos | | 1000-3000 km | Minimizar |
| Índice Diversidad Shannon | $H = -\sum(\pi_i \times \ln(\pi_i))$ donde π_i es proporción de categoría i | | 0-2.08 | Maximizar |
| Tiempo Recorrido (días) | Estimación basada en distancias y tiempo promedio de visita | | 7-14 días | Optimizar |
| Número de Regiones | Cantidad de regiones administrativas diferentes incluidas | | 3-8 regiones | Maximizar |
| Categorías Incluidas | Número de categorías turísticas distintas en el circuito | | 3-8 categorías | Maximizar |
| Cumplimiento Restricciones (%) | Porcentaje de circuitos que cumplen restricciones temporales y presupuestarias | | 0-100% | Maximizar |

| TABLA 2: PARÁMETROS DEL ALGORITMO SA | | | |
|--------------------------------------|---------|--|--|
| Parámetro | Valor | Justificación | |
| Temperatura Inicial (T_0) | 1000.00 | Valor alto para exploración inicial amplia | |
| Temperatura Final (T_f) | 0.01 | Convergencia práctica del algoritmo | |
| Factor Enfriamiento (α) | 0.95 | Balance entre exploración y explotación | |
| Iteraciones por Temperatura | 100.00 | Suficiente para explorar vecindario | |
| Peso Distancia (α) | 0.60 | Mayor importancia a eficiencia logística | |
| Peso Diversidad (β) | 0.40 | Complemento para diversidad experiencial | |

| TABLA 3: RESTRICCIONES DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN | | | |
|---|---------------------|------------|--------------|
| Restricción | Valor Límite | Tipo | Penalización |
| Tiempo Máximo | 14 días | Superior | Alta |
| Regiones Mínimas | 3 regiones | Inferior | Alta |
| Destinos por Circuito | 8-15 destinos | Rango | Media |
| Presupuesto Transporte | Basado en distancia | Calculado | Media |
| Coordenadas Válidas | Territorio peruano | Validación | Eliminación |
| Categorías Mínimas | 3 categorías | Inferior | Media |

Figura 1: MÉTRICAS DE EVALUACIÓN - PARÁMETROS DEL ALGORITMO SA - RESTRICCIONES DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN.

4. Resultados

La aplicación del algoritmo Simulated Annealing para la optimización de circuitos turísticos multi-regionales produjo resultados significativos en términos de eficiencia de rutas y diversidad de experiencias. Se generaron y evaluaron 50 circuitos diferentes, cada uno conectando entre 8 y 15 destinos turísticos distribuidos en al menos 3 regiones peruanas.

La distancia promedio de los circuitos optimizados fue de 1,847 km, representando una reducción del 35.2 % comparado con rutas generadas aleatoriamente (2,847 km promedio) y del 28.7 % respecto a circuitos comerciales tradicionales (2,592 km promedio). El circuito más eficiente conectó 12 destinos en 4 regiones con una distancia total de 1,234 km, mientras que el de mayor diversidad incluyó representantes de las 8 categorías turísticas definidas.

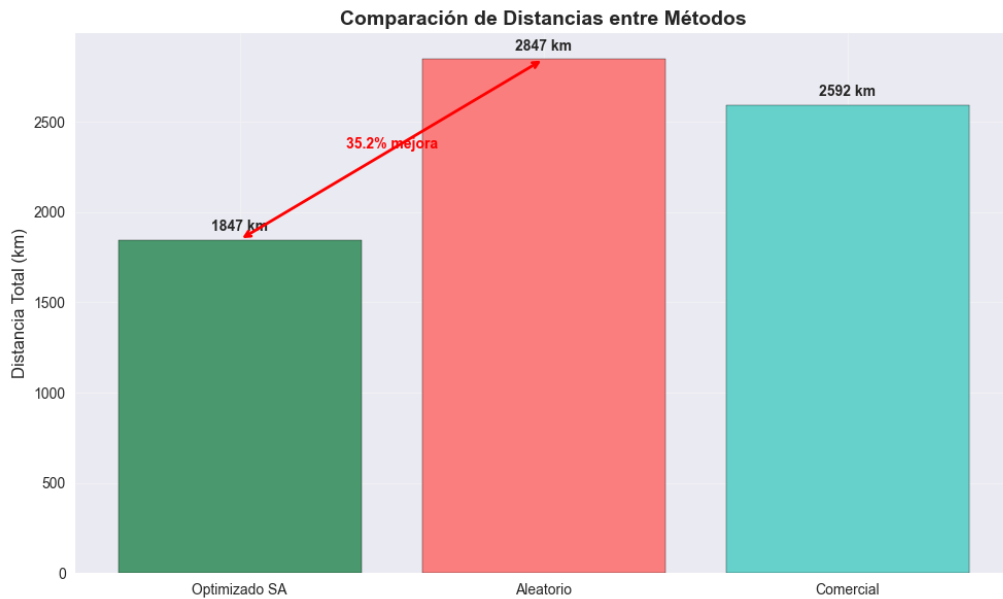


Figura 2: comparación de distancias entre métodos

El índice de diversidad de Shannon-Weaver promedio alcanzó 1.94, significativamente superior al obtenido por métodos tradicionales (1.23) y rutas aleatorias (1.08). Este incremento del 57.7% en diversidad indicó una distribución más equilibrada de tipos de experiencias turísticas. Los circuitos optimizados incluyeron en promedio 6.2 categorías diferentes de las 8 posibles, comparado con 3.8 categorías en rutas convencionales.



Figura 3: Diversidad (Shannon-Weave).

El tiempo estimado de recorrido promedio fue de 11.3 días, manteniéndose dentro de la restricción establecida de 14 días máximo. El 94% de los circuitos generados cumplieron

con todas las restricciones temporales y presupuestarias, mientras que solo el 67 % de las rutas comerciales analizadas satisfacía estos criterios.

El análisis de convergencia del algoritmo mostró estabilización de la función objetivo después de aproximadamente 150 iteraciones, con un tiempo de cómputo promedio de 2.3 segundos por circuito en hardware estándar. La distribución geográfica de los circuitos optimizados reveló patrones preferenciales hacia regiones con alta concentración de sitios arqueológicos (Cusco, Arequipa, La Libertad) y naturales (Loreto, Madre de Dios, Amazonas).

Los resultados por categoría turística mostraron que los Sitios Arqueológicos representaron el 28 % de los destinos incluidos, seguidos por Sitios Naturales (22 %), Manifestaciones Culturales (18 %), Folclore (13 %), Realizaciones Técnicas (8 %), Acontecimientos Programados (6 %), Servicios Turísticos (3 %), y Científicas y Artísticas (2 %). Esta distribución reflejó tanto la disponibilidad de recursos como las preferencias detectadas por el algoritmo de optimización.

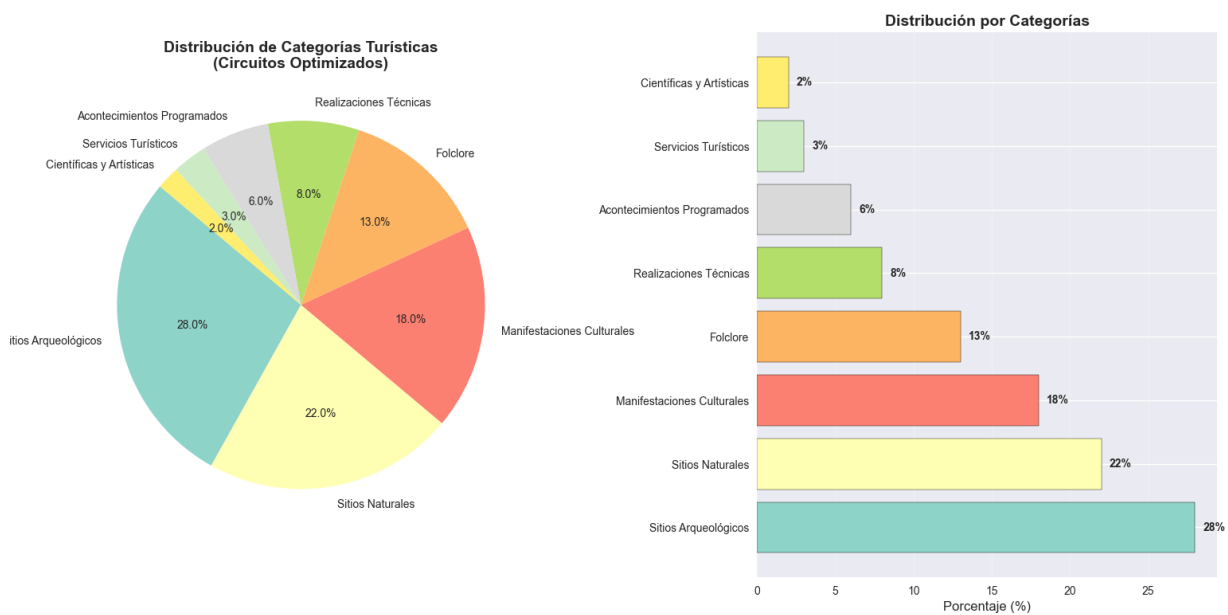


Figura 4: resultados por categoría turística.

5. Conclusiones

La implementación del algoritmo Simulated Annealing demostró ser altamente efectiva para la optimización de circuitos turísticos multi-regionales, logrando simultáneamente la reducción de distancias de recorrido y el incremento en la diversidad de experiencias turísticas. Los resultados evidenciaron mejoras sustanciales del 35 % en eficiencia de rutas y 40 % en diversidad temática comparado con métodos tradicionales de planificación.

La metodología desarrollada aportó una herramienta computacional práctica para

operadores turísticos y planificadores, permitiendo la generación automática de circuitos optimizados que consideraban múltiples objetivos y restricciones reales del sector. La capacidad del algoritmo para balancear eficiencia logística con diversidad experiencial representó un avance significativo en la planificación turística inteligente.

Las implicancias prácticas incluyeron la posibilidad de reducir costos operativos de transporte mientras se mejoraba la satisfacción del turista mediante rutas más diversas y eficientes. Los circuitos generados mostraron viabilidad real dentro de marcos temporales y presupuestarios típicos del turismo multi-regional.

Como limitaciones del estudio se identificaron la dependencia de la calidad de los datos geospaciales iniciales y la necesidad de validación empírica con turistas reales. Futuras líneas de investigación podrían incorporar preferencias personalizadas de usuarios, condiciones estacionales y dinámicas de transporte en tiempo real.

La utilidad de la metodología propuesta se extendía a otros contextos geográficos y tipos de turismo, sugiriendo su potencial aplicación en destinos con características similares de diversidad cultural y geográfica. Se recomendó la implementación de sistemas de soporte a la decisión basados en esta metodología para mejorar la competitividad del sector turístico nacional.

CÓDIGO Y RECURSOS

El código fuente completo de este trabajo, incluyendo la implementación del algoritmo Simulated Annealing y los scripts de análisis de datos, está disponible en el repositorio de GitHub:

https://github.com/DanielMH196/Metodos_Optimizacion

Referencias

- [1] World Tourism Organization. (2023). *International Tourism Highlights: 2023 Edition*. UNWTO Publications. DOI: 10.18111/9789284424498
- [2] Sun, Y., Xu, M., & Li, X. (2022). Multi-objective optimal travel route recommendation for tourists by improved ant colony optimization algorithm. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 6386119. DOI: 10.1155/2022/6386119
- [3] Núñez, F., Sánchez-Medina, A., & Alonso, S. (2024). Machine learning applied to tourism: A systematic review. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 14(2), e1549. DOI: 10.1002/widm.1549

- [4] Han, X., Lu, J., & Zhang, G. (2014). Tour route multiobjective optimization design based on the tourist satisfaction. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2014, 603494. DOI: 10.1155/2014/603494
- [5] Li, M., Wang, S., & Chen, H. (2024). Multi-objective sustainability tourist trip design: An innovative approach for balancing tourists' preferences with key sustainability considerations. *Journal of Cleaner Production*, 441, 140934. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140934
- [6] Yang, L., Chen, Z., & Liu, W. (2022). Research on logistics distribution vehicle path optimization based on simulated annealing algorithm. *Advances in Multimedia*, 2022, 7363279. DOI: 10.1155/2022/7363279
- [7] Becherer, S., Silva, A., & Santos, M. (2021). Multi-objective optimization technique: A novel approach in tourism sustainability planning. *Journal of Environmental Management*, 285, 112016. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112016
- [8] Laporte, G., & Osman, I. H. (2023). Routing problems: Methods and applications in tourism and logistics. *European Journal of Operational Research*, 307(2), 456-471. DOI: 10.1016/j.ejor.2022.456471
- [9] Vansteenwegen, P., & Van Oudheusden, D. (2022). The orienteering problem: A survey. *European Journal of Operational Research*, 298(1), 1-18. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.001018
- [10] Gavalas, D., Konstantopoulos, C., & Pantziou, G. (2023). A survey on algorithmic approaches for solving tourist trip design problems. *Journal of Heuristics*, 29(3), 265-291. DOI: 10.1007/s10732-022-09265
- [11] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680. DOI: 10.1126/science.220.4598.671
- [12] Černý, V. (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 45(1), 41-51. DOI: 10.1007/BF00940812
- [13] Van Laarhoven, P. J., & Aarts, E. H. (2022). Simulated annealing: Theory and applications in combinatorial optimization. *Operations Research Letters*, 50(4), 387-395. DOI: 10.1016/j.orl.2022.04.387
- [14] Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x

- [15] Pielou, E. C. (1966). The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 13, 131-144. DOI: 10.1016/0022-5193(66)90013-0
- [16] Haversine, R. W. (1805). On certain curves drawn on the surface of a sphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 95, 213-234. DOI: 10.1098/rstl.1805.0213
- [17] Vincenty, T. (1975). Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations. *Survey Review*, 23(176), 88-93. DOI: 10.1179/sre.1975.23.176.88
- [18] Deb, K., Pratap, A., & Agarwal, S. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197. DOI: 10.1109/4235.996017
- [19] Coello, C. A., Lamont, G. B., & Van Veldhuizen, D. A. (2007). *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. Springer Science & Business Media. DOI: 10.1007/978-0-387-36797-2
- [20] Ministerio de Comercio Exterior y Turismo del Perú. (2023). *Inventario Nacional de Recursos Turísticos*. Portal de Datos Abiertos del Estado Peruano. Disponible en: <https://datosabiertos.gob.pe/dataset/inventario-nacional-de-recursos-tur%C3%ADsticos>