



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN DESARROLLO DE
VIDEOJUEGOS Y REALIDAD VIRTUAL

**Análisis morfométrico interdisciplinario de pistas
de juegos de Carrera**

IGNACIO VEAS

Profesor Guía: BEN INGRAM

Memoria para optar al título de
Ingeniero en Desarrollo de Videojuegos y Realidad Virtual

Talca – Chile
Agosto, 2021



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN DESARROLLO DE
VIDEOJUEGOS Y REALIDAD VIRTUAL

**Análisis morfométrico interdisciplinario de pistas
de juegos de Carrera**

IGNACIO VEAS

Profesor Guía: BEN INGRAM

Memoria para optar al título de
Ingeniero en Desarrollo de Videojuegos y Realidad Virtual

El presente documento fue calificado con nota: _____

Talca – Chile

Agosto, 2021

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a mi profesor guía, padres y pareja que estuvieron conmigo durante el transcurso de este largo proyecto, quienes no solo me ayudaron, sino que fueron recordatorio constante de mi esfuerzo y capacidades.

TABLA DE CONTENIDOS

	página
Agradecimientos	I
Tabla de Contenidos	II
Índice de Figuras	VI
Índice de Tablas	VIII
Resumen	IX
1. Introducción	1
1.1. Problemas específicos	2
1.2. Hipótesis	2
1.3. Pregunta de investigación	2
1.4. Objetivo general	2
1.5. Objetivos específicos	2
1.6. Esquema del documento	3
2. Estado del Arte	4
2.1. Análisis morfométricos de la actualidad	4
2.1.1. Diseños de circuitos reales	4
2.1.2. Análisis en videojuegos	4
2.2. Métricas morfométricas interdisciplinarias	5
2.3. Corpus de pistas de carrera	7
2.3.1. Videojuegos comerciales	7
2.3.2. Herramientas y métodos procedurales	8
2.3.3. Referencias reales	11
3. Marco Teórico	12
3.1. Presentación de datos	12
3.1.1. Min-Max Scaling	12
3.1.2. Radar Chart	13

3.1.3.	Tabla comparativa X–Y	13
3.1.4.	Mapa de correlación (Heatmap)	14
3.2.	Programación	14
3.2.1.	Plataforma y Lenguaje de programación	14
3.2.2.	Procesamiento y almacenamiento de datos	15
3.2.3.	Lectura y visualización de datos	15
3.2.4.	Estructura modular y escalabilidad	15
4.	Marco Metodológico	16
4.1.	Tipo y diseño de investigación	16
4.2.	Corpus y unidades de análisis	16
4.3.	Obtención de los trazados de las pistas	17
4.4.	Traducción a mapas de vértices	18
4.5.	Adaptación de métricas morfométricas a un modelo discreto de vértices	20
4.6.	Arquitectura del sistema de análisis	23
4.6.1.	Módulo de cálculo morfométrico	23
4.6.2.	Módulo de visualización y comparación	24
4.7.	Métodos de análisis	26
4.8.	Procedimiento general	27
5.	Experimentos	28
5.1.	Corpus de pistas analizado	28
5.2.	Preparación de datos para el experimento	29
5.3.	Experimentos realizados	29
5.3.1.	Experimento 1: Comparación multivariada global	29
5.3.2.	Guía de interpretación de Radar Charts	29
5.3.3.	Experimento 2: Comparaciones bivariadas	30
5.3.4.	Guía de interpretación de Comparaciones bivariadas	30
5.3.5.	Experimento 3: Análisis de correlación	31
5.3.6.	Guía de interpretación de Análisis de correlación	31
5.4.	Procedimiento experimental	31
6.	Resultados y Discusión	32
6.1.	Comparación multivariable de perfiles morfométricos	32
6.1.1.	Radar Charts representativos	32

6.2.	Comparación bivariada entre métricas	35
6.2.1.	Relaciones entre sinuosidad y frecuencia de curvatura	35
6.2.2.	Curvatura media y longitud máxima de recta	36
6.2.3.	Asimetría direccional y complejidad geométrica	37
6.3.	Análisis global de correlación	38
6.3.1.	Heatmap de métricas morfométricas	39
6.3.2.	Diferencias estructurales entre dominios	39
7.	Conclusiones y Trabajo Futuro	40
7.1.	Conclusiones	40
7.2.	Aportes del estudio	41
7.3.	Limitaciones	41
7.4.	Trabajo futuro	42
7.4.1.	Ampliación de métricas geométricas	42
7.4.2.	Extensión a modelos tridimensionales	42
7.4.3.	Expansión del corpus de pistas y generadores	42
7.4.4.	Automatización del análisis	43
	Glosario	44
	Bibliografía	48
A:	Race Track Outlines Appendix	51
B:	Radar charts completo del corpus	78
B.1.	Pistas comerciales	78
B.1.1.	Mario Kart Wii	78
B.1.2.	Mario Kart World	79
B.1.3.	Diddy Kong Raicing	79
B.1.4.	Crash Team Raicing Nitro Fueled	80
B.1.5.	Sonic Raicing Zero Gravity	80
B.1.6.	Super Tux Kart	81
B.2.	Pistas Procedurales	81
B.2.1.	Convex Hull	81
B.2.2.	Procedural-X_UniY_Exp	82

B.2.3.	Chaincode_Original	82
B.2.4.	Chaincode_Compleja	83
B.2.5.	Camilla	83
B.2.6.	IngramT1	84
B.2.7.	IngramT2	84
B.3.	Pistas Vida Real	85
B.3.1.	F1	85
C:	Heatmap completo del corpus	86
C.1.	Pistas comerciales	86
C.1.1.	Mario Kart Wii	86
C.1.2.	Mario Kart World	87
C.1.3.	Diddy Kong Raicing	87
C.1.4.	Crash Team Raicing Nitro Fueled	88
C.1.5.	Sonic Raicing Zero Gravity	88
C.1.6.	Super Tux Kart	89
C.2.	Pistas Procedurales	89
C.2.1.	Convex Hull	89
C.2.2.	Procedural-X_UniY_Exp	90
C.2.3.	Chaincode_Original	90
C.2.4.	Chaincode_Compleja	91
C.2.5.	Camilla	91
C.2.6.	IngramT1	92
C.2.7.	IngramT2	92
C.3.	Pistas Vida Real	93
C.3.1.	F1	93

ÍNDICE DE FIGURAS

	página
2.1. Generación de una colección de puntos aleatorios utilizada como base para la construcción de una envoltura convexa.	9
2.2. Ejemplos de parametrización para suavizar la trayectoria entre puntos, como los métodos uniforme, centrípeto y chordal.	9
2.3. (a) Interpretación visual de las 8 direcciones posibles y (b) una secuencia discreta corta de direcciones, que forma un recorrido	10
2.4. Ejemplo visual de un diagrama de Voronoi, donde podemos ver los segmentos creados, con particiones espaciales que permiten la creación de posibles recorridos	10
4.1. Mapa de vértices de una pista, donde cada columna, representa la coordenada x y y	20
4.2. Visualización de la trayectoria de la pista conectando los vértices del mapa, mostrando el recorrido principal que se utilizará para el cálculo de métricas morfométricas.	20
4.3. Interfaz del módulo de cálculo morfométrico para el procesamiento de pistas. El sistema procesa la totalidad de archivos seleccionados, permitiendo establecer valores mínimos y máximos globales.	24
4.4. Ejemplos visuales de ejemplos de normalización de datos: Super Tux Kart: CentralPath_abyss_1 y CentralPath_volcano_island_1 Procedural-X_UniY_Exp: track_011_1 Formula1: nl-1948.	24
4.5. Ejemplo de visualización mediante <i>Radar Chart</i> , mostrando la comparación multivariable entre distintas pistas.	25
4.6. Ejemplo de comparación bidimensional entre dos métricas morfométricas.	25
4.7. Mapa de correlación entre métricas morfométricas.	26
6.1. Perfil morfométrico multivariado de pistas comerciales de <i>Mario Kart Wii</i> . El área sombreada (amarilla) representa la envoltente de los perfiles individuales de las 20 pistas analizadas, evidenciando la dispersión y concentración de los valores por métrica.	32

- 6.2. Perfil morfométrico multivariado de pistas generadas mediante el método procedural *Chaincode_Compleja*, El área sombreada (azul) representa el perfil individual de más de 100 casos generados con esta técnica. 33
- 6.3. Perfil morfométrico multivariado de circuitos reales de *Fórmula 1*, Donde el área sombreada (naranja) está cubierta por más de 30 pistas de la F1. 34
- 6.4. Relación bivariada entre sinuosidad y frecuencia de curvatura en pistas comerciales (triángulos rosados), procedurales (cuadrados azules) y reales (círculos naranja). Se observa una mayor dispersión regulada en el modelo procedural (*Chaincode_Compleja*), mientras que los casos comerciales y reales presentan mayor concentración con baja Sinuosidad, reflejando objetivos de diseño diferenciados. 35
- 6.5. Manteniendo la misma iconografía, colores y simbologías, podemos presenciar una relación inversa entre curvatura media y longitud máxima de recta en pistas de distinto origen. Los trazados procedurales presentan una concentración bajo un nivel de Longitud máxima de recta, mientras que los circuitos comerciales y reales exhiben mayor dispersión en ambas métricas. 36
- 6.6. Bajo la misma iconografía, se presencia la siguiente relación entre asimetría direccional y frecuencia de curvatura. Las pistas comerciales presentan mayores niveles de asimetría, mientras que el enfoque procedural mantiene valores intermedios, reflejando un control geométrico más regular. 37
- 6.7. Mapa de correlación entre métricas morfométricas, tenemos las pistas comerciales de *Mario Kart Wii*. Se observan correlaciones moderadas y distribuidas, con baja dependencia estructural entre métricas, lo que sugiere un diseño orientado a decisiones lúdicas más flexibles. 38
- 6.8. Mapa de correlación entre métricas morfométricas, en pistas generadas proceduralmente mediante *Chaincode_Compleja*. Se evidencian correlaciones más intensas y estructuradas, destacando relaciones negativas fuertes entre frecuencia de curvatura y longitud máxima de recta, propias de un modelo generativo regulado. 38

ÍNDICE DE TABLAS

página

RESUMEN

En la actualidad, la generación procedural es una técnica de diseño de contenido que utiliza algoritmos para crear automáticamente elementos sin la intervención manual directa. Un área emergente en diferentes áreas, incluido en los videojuegos de carreras, especialmente en el subgénero *Kart*, que simplifica sus mecánicas de conducción y añade elementos distintos como obstáculos y potenciadores, manteniendo componentes clásicos de pistas como curvas y rectas. No obstante, no se ha explorado cómo varía la estructura morfométrica entre circuitos diseñados manualmente y aquellos generados proceduralmente. Este análisis puede abordarse con métricas de diferentes disciplinas científicas para comparar cuantitativamente las pistas, contribuyendo a diseñar experiencias de juego más satisfactorias. La morfometría, que cuantifica formas y dimensiones, ofrece un marco adecuado para este propósito.

La propuesta se basa en una metodología exploratoria que recopila datos tanto manuales como generadas proceduralmente, para compararlos mediante un análisis morfométrico interdisciplinario en pistas del subgénero *Kart*. Se emplearán métricas como la *Sinuosidad*, que mide la relación entre la longitud real del camino y la distancia recta para detectar curvas, y el índice de curvatura media, que evalúa el valor promedio de las curvas del recorrido, entre otros análisis. Los datos serán visualizados en gráficos de tipo *radar chart* para facilitar la comparación multivariada, además de otros tipos de gráficos cuales puede trabajar con una cantidad específica de valores.

Se espera identificar y visualizar diferencias estructurales en varias pistas y generadores del género, detectando patrones comunes o divergentes. Las métricas multidisciplinarias permitirán establecer un marco de análisis útil para futuros desarrollos y validación de procesos de generación procedural, guiando a diseñadores hacia configuraciones equilibradas que ellos busquen realizar.

Este proyecto aportará una metodología sólida para evaluar y comparar pistas, ayudando a optimizar procesos creativos mediante análisis objetivos. Al cuantificar diferencias morfométrica, se abre la posibilidad de relacionar estructuras con aspectos claves de la experiencia del jugador, como la fluidez y variedad, sentando bases para investigaciones futuras en diseño de pistas inmersas y entretenidas, promoviendo su adopción en el desarrollo de videojuegos de carreras.

1. Introducción

La generación procedural se ha consolidado como una técnica de alto rendimiento dentro de la industria de los videojuegos, al permitir la creación automatizada de elementos como mapas, niveles y entornos sin una intervención manual directa. Su aplicación se ha expandido ampliamente en géneros como estrategia, plataformas y, más recientemente, en los videojuegos de carrera, donde se busca optimizar la variedad y rejugabilidad de los escenarios [1].

Dentro de este último género, los videojuegos del subgénero *Kart* presentan una oportunidad particular de estudio, al combinar simplicidad en sus mecánicas de conducción con un diseño de pistas que enfatiza la creatividad y la variabilidad. Estas pistas, caracterizadas por curvas pronunciadas, saltos, obstáculos y tramos poco convencionales, rara vez han sido objeto de una evaluación cuantitativa de su estructura espacial. La carencia de métricas objetivas dificulta comparar su morfología y entender cómo las distintas metodologías de creación, manual o procedural, afectan la experiencia del jugador y el equilibrio del diseño.

El presente trabajo propone el desarrollo de un marco de análisis morfométrico y visual que permita evaluar de manera sistemática la estructura de pistas de carrera, tanto tradicionales como generadas proceduralmente. A través del uso de métricas multidisciplinarias, como la sinuosidad o la frecuencia de curva, cuales comúnmente son aplicadas en áreas como la Geomorfología o la Ingeniería Vial, se busca caracterizar cuantitativa mente las formas de las pistas y representar sus resultados mediante herramientas visuales que faciliten su interpretación estructural. Este enfoque no sólo pretende establecer diferencias objetivas entre ambos tipos de pistas, sino también ofrecer una herramienta de análisis que contribuya a la mejora de los procesos de diseño y generación procedural.

1.1. Problemas específicos

Uno de los principales problemas identificados es la ausencia de herramientas que permitan evaluar de forma objetiva la estructura espacial de las pistas en videojuegos del subgénero *Kart*, tanto en aquellas diseñadas manualmente como en las generadas de manera procedural. A ello se suma la dificultad de adaptar métricas morfométricas provenientes de otras disciplinas a un contexto de diseño interactivo, y de representar los resultados de forma comprensible para diseñadores y analistas. La falta de una metodología visual y cuantitativa limita la capacidad de identificar patrones estructurales, dificultando la clasificación de pistas según su complejidad, densidad o coherencia geométrica.

1.2. Hipótesis

La caracterización morfométrica de pistas de carrera permitirá establecer diferencias significativas en su estructura y composición según el método de creación, proporcionando una base objetiva para comparar y evaluar sus diseños.

1.3. Pregunta de investigación

¿Pueden las métricas morfométricas interdisciplinarias aplicarse eficazmente a un análisis estructural de pistas de videojuegos de carrera, permitiendo identificar diferencias significativas entre aquellas generadas proceduralmente y las diseñadas manualmente?

1.4. Objetivo general

Desarrollar un marco de análisis morfométrico y visual que permita evaluar de manera sistemática la estructura de pistas de carrera, tanto tradicionales como generadas proceduralmente.

1.5. Objetivos específicos

- Implementar métricas morfométricas relevantes para caracterizar pistas de carreras.

- Visualizar las métricas mediante gráficos que faciliten la interpretación estructural.
- Generar un corpus representativo de pistas de videojuegos de carrera que sirva como base del análisis.
- Analizar la capacidad de las métricas para identificar patrones y diferencias estructurales entre pistas tradicionales y generadas proceduralmente.

1.6. Esquema del documento

El documento se organiza de la siguiente manera: en el **Capítulo 2**, se presenta el estado del arte, incluyendo antecedentes en generación procedural, análisis morfométrico y herramientas de evaluación estructural aplicadas en contextos similares. En el **Capítulo 3**, se desarrolla el marco teórico que sustenta la investigación, abarcando los conceptos de morfometría, representación espacial y métricas cuantitativas. El **Capítulo 4** describe la metodología empleada, incluyendo el diseño del marco de análisis y los procedimientos de recopilación y tratamiento de datos. El **Capítulo 5** presenta los experimentos a realizar, incluyendo el procedimiento y el método de análisis a usar. Finalmente, el **Capítulo 6** expondrá los resultados bajo el análisis de los datos entregados por los tipos de gráfico y finalmente el **Capítulo 7**, expone las conclusiones, el impacto del estudio y posibles líneas de trabajo futuro. **Al final del documento** se entrega las pistas analizadas en forma de figuras y sus respectivos gráficos.

2. Estado del Arte

2.1. Análisis morfométricos de la actualidad

El análisis morfométrico, aplicado tradicionalmente en disciplinas como la geomorfología y la ingeniería, se centra en describir cuantitativamente la forma y estructura de elementos espaciales. En el contexto actual, estos métodos han demostrado ser herramientas efectivas para caracterizar objetos complejos, permitiendo una comprensión más profunda de su composición geométrica y sus patrones internos.

Recientemente, también se han explorado métodos de generación procedural de pistas de carrera con el objetivo de crear trazados variados y estructuralmente diversos, para simuladores de conducción [2]. Estos estudios destacan la importancia de caracterizar la forma y la complejidad de los trazados, reforzando la utilidad de métricas morfométricas para comparar circuitos de distinto origen.

2.1.1. Diseños de circuitos reales

En el ámbito de la ingeniería vial y del transporte, el diseño geométrico de circuitos y carreteras responde a parámetros específicos de seguridad, confort y rendimiento. Las métricas relacionadas con la curvatura, longitud de tramos rectos y radios de giro son esenciales para definir la experiencia de conducción y la viabilidad estructural de las pistas. Estos principios sirven como base metodológica para trasladar el análisis morfométrico al estudio de circuitos virtuales. [3].

2.1.2. Análisis en videojuegos

Los videojuegos de carrera han evolucionado desde diseños predominantemente intuitivos y estéticos hacia enfoques más técnicos y medibles. Actualmente, las

herramientas digitales y los motores de desarrollo permiten representar, modificar y analizar pistas con mayor precisión [4]. No obstante, la mayoría de los estudios continúa centrada en la jugabilidad o la experiencia del usuario, dejando en segundo plano una caracterización cuantitativa sistemática de la estructura espacial de los trazados [5].

Si bien existen trabajos que incorporan medidas de forma dentro de procesos de generación procedural u optimización, por ejemplo, mediante funciones basadas en perfiles de curvatura y velocidad, estas aproximaciones se orientan principalmente a la evaluación del diseño y no desarrollan un marco explícito de análisis morfométrico ni una comparación estructural entre pistas de distinto origen [6]. Este vacío motiva la aplicación de métricas morfométricas interdisciplinarias al análisis de entornos virtuales.

2.2. Métricas morfométricas interdisciplinarias

Las métricas morfométricas permiten cuantificar aspectos estructurales de objetos espaciales. Se seleccionaron métricas provenientes de distintas disciplinas, adaptadas al contexto de pistas de carrera, con el fin de caracterizar su forma, complejidad y organización geométrica. [7, 8]

■ Sinuosidad (Geomorfología):

Mide el grado de curvatura general en relación con la longitud total, proporcionando una idea del nivel de desviación respecto a una línea recta.[9]

$$S = \frac{L_r}{L_d}$$

donde:

- L_r : Longitud real del trayecto.
- L_d : Distancia en línea recta entre inicio y fin.

Un valor de $S = 1$ indica un trayecto recto; valores mayores a 1 reflejan mayor curvatura.

■ Frecuencia de Curvatura (Ingeniería vial):

Analiza la densidad de curvas en un camino, parámetro comúnmente empleado en ingeniería vial para evaluar velocidad y seguridad.[10]

$$F_c = \frac{N_c}{L_t} \quad \text{o bien} \quad F_c = \frac{N_c}{T}$$

donde:

- N_c : Número total de curvas.
- L_t : Longitud total del trayecto.
- T : Tiempo total del recorrido (si se desea usar tiempo).

■ **Índice de Curvatura Media (Geomorfología / análisis de contornos):**

Calcula el promedio de curvatura en líneas y contornos, útil para describir la forma general de una pista o segmento.[11]

$$K = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-2} \theta_i$$

donde:

- θ_i : Ángulo entre segmentos consecutivos.
- n : Número total de puntos que componen la trayectoria.

■ **Longitud Máxima de Recta (Ingeniería de transporte / Diseño de circuitos):**

Identifica los tramos rectos más extensos, relacionados con la percepción de fluidez y la posibilidad de alcanzar mayores velocidades. [12]

$$L_{\text{máx}} = \max\{L_j\}$$

donde:

- L_j : Longitud de cada subsección continua en la que no ocurren cambios angulares significativos.

■ **Asimetría Direccional (Geomática / Análisis de trayectorias):**

Evalúa la proporción entre giros hacia la izquierda y hacia la derecha, permitiendo analizar el equilibrio estructural y el estilo del diseño.[13]

$$A = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-2} d_{\perp}(i)$$

con:

$$d_{\perp} = \frac{|ax + by + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

donde:

- $d_{\perp}(i)$: Distancia perpendicular del punto i a la línea definida entre inicio y fin.
- a, b, c : Coeficientes de la recta inicio-fin.

2.3. Corpus de pistas de carrera

El corpus empleado en esta investigación integra fuentes heterogéneas que abarcan tanto entornos virtuales de libre acceso como herramientas procedurales y referencias del mundo real. Este conjunto de datos permite establecer una base empírica para la comparación estructural entre diferentes tipos de pistas.

2.3.1. Videojuegos comerciales

Para representar prácticas de diseño profesional y distintas escuelas de creación de circuitos, se consideraron videojuegos de diferentes épocas, estilos y filosofías de jugabilidad. Todos ellos ofrecen *minimapas* o representaciones vectorizables, lo que permite la extracción estructural necesaria para el cálculo de métricas.

- **Crash Team Racing Nitro-Fueled (2019)**: Remake moderno de un referente clásico del género *kart*, caracterizado por trazados con curvas cerradas y énfasis en la técnica del derrape.[14]
- **Diddy Kong Racing (1997)**: Título de Nintendo 64 que presenta pistas con rutas múltiples, variaciones de terreno y estructuras menos estandarizadas, representando diseños tempranos del género.[15]

- **Mario Kart Wii (2008):** Videojuego familiar de alta popularidad que combina secciones técnicas con tramos amplios y saltos, pensado para un público general.[16]
- **Mario Kart World (2025):** Representante moderno de Nintendo, diseño altamente depurado y uso intensivo de elementos visuales, como rutas alternativas.[17]
- **Sonic Riders: Zero Gravity (2008):** Videojuego que incorpora mecánicas de “control de gravedad” para giros abruptos y viaje rápido para tramos prolongados, ofreciendo un estilo de pista diferente al *kart* tradicional.[18]
- **Super Tux Kart (Open Source):** Proyecto de código abierto que permite acceso directo a los archivos base de cada pista, facilitando la extracción precisa de los trazados.[19]

Esta selección representa un espectro equilibrado entre generaciones retro, contemporáneas y de código abierto, ofreciendo diversidad en estilos de geometría.

2.3.2. Herramientas y métodos procedurales

Para contrastar los diseños manuales con estructuras generadas mediante algoritmos, se incorporaron distintos métodos y herramientas procedurales que presentan variados enfoques de construcción con geométrica y control estructural.

Investigaciones previas han abordado la generación procedural de pistas de carrera mediante distintos enfoques. Cardamone et al. (2011) proponen un sistema de evolución interactiva para la generación de trazados, aplicando técnicas de Search-Based Procedural Content Generation (SB-PCG) [20]. Prasetya y Maulidevi (2016) presentan un enfoque basado en optimización heurística, evaluando las configuraciones geométricas mediante funciones orientadas a jugabilidad y coherencia espacial [21]. De manera complementaria, Chen et al. (2012) codifican perfiles de curvatura para clasificar giros y complejidad estructural de las pistas [22]. Si bien estos trabajos evidencian el potencial de la generación automática de trazados, no incorporan un análisis morfométrico cuantitativo sistemático de la estructura geométrica de las pistas, aspecto central del presente estudio.

- **Convex Hull:** Método geométrico utilizado como referencia teórica para la generación de circuitos artificiales mediante envolturas convexas [23]. A partir

de una semilla de puntos generados aleatoriamente, se construye un contorno que encierra el conjunto, el cual puede ser suavizado mediante distintos métodos de parametrización para generar un trazado continuo.

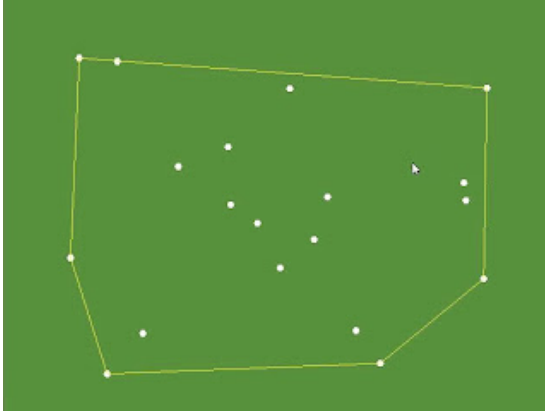


Figura 2.1: Generación de una colección de puntos aleatorios utilizada como base para la construcción de una envoltura convexa.

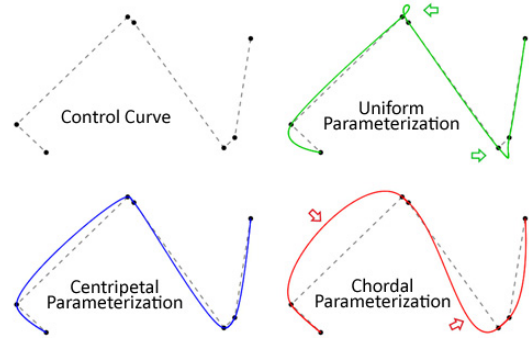


Figura 2.2: Ejemplos de parametrización para suavizar la trayectoria entre puntos, como los métodos uniforme, centrípeto y chordal.

- **Procedural X-UniY-Exp:** Método procedural experimental desarrollado como parte del proyecto para la generación de pistas, basado y modificado a partir del enfoque de envoltura convexa. En este sistema se genera un conjunto de puntos dentro de un espacio normalizado, donde la coordenada x se distribuye de manera uniforme, mientras que la coordenada y se ve afectada por una función exponencial que controla la densidad de puntos.
- **Chain-code-Original:** Método de generación procedural basado en *chain code*, técnica que representa un trazado mediante una secuencia discreta de 8 direcciones posibles. En esta variante se utilizan secuencias cortas de direcciones, lo que da lugar a pistas con un número reducido de vértices y una estructura global más controlada, permitiendo observar patrones geométricos claramente definidos. [4]
- **Chain-code-Compleja:** Variante del método anterior que emplea secuencias extensas de direcciones, incrementando significativamente el número de vértices y la complejidad local del trazado.

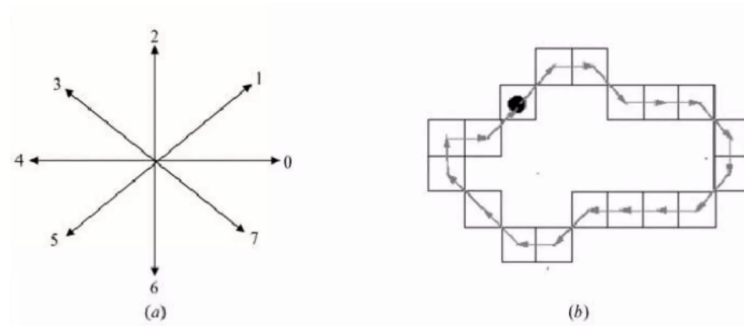


Figura 2.3: (a) Interpretación visual de las 8 direcciones posibles y (b) una secuencia discreta corta de direcciones, que forma un recorrido

- **Camilla:** Método procedural basado en la generación de diagramas de Voronoi, método usado en algunos generadores con el fin de distribuir segmentos [24]. A partir de un conjunto de puntos aleatorios distribuidos sobre el plano, se construye una partición espacial cuyos vértices se utilizan para definir un contorno continuo. El trazado resultante presenta formas irregulares y una fuerte dependencia de la distribución inicial de los puntos. [25]

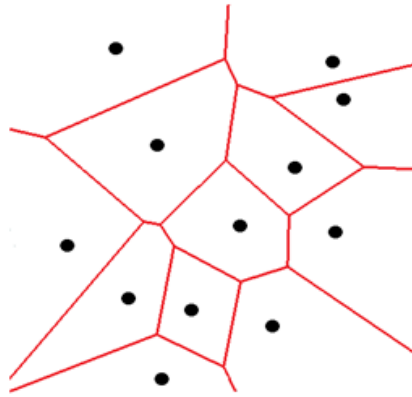


Figura 2.4: Ejemplo visual de un diagrama de Voronoi, donde podemos ver los segmentos creados, con particiones espaciales que permiten la creación de posibles recorridos

- **Ingram T1:** Otro método procedural experimental desarrollado desde un enfoque distinto de los existentes, basado en un método que opera sobre una grilla discreta, en la cual se selecciona aleatoriamente un conjunto de puntos. Cada punto genera un ángulo inicial y se conecta preferentemente con el punto más cercano, produciendo trazados cóncavos. Las trayectorias resultantes son suavizadas mediante curvas de Bézier, método usado en generación de pista para formar recorridos más suaves [26].

- **Ingram T2:** Variante del método anterior que prioriza la ocupación del espacio disponible dentro de la grilla. En este caso, el criterio de conexión busca maximizar la cobertura espacial, generando trazados más cerrados, manteniendo el suavizado mediante curvas de Bézier.

Estas fuentes permiten observar diferencias estructurales entre trazados humanos y generados.

2.3.3. Referencias reales

- **Pistas de Fórmula 1:** Se incorporaron trazados reales como referencia empírica, obtenidos a partir de representaciones geométricas disponibles en repositorios abiertos. Estos trazados permiten contrastar métricas morfométricas provenientes de diseños profesionales basados en criterios de ingeniería vial con aquellas derivadas de pistas virtuales y procedurales, sirviendo como punto de comparación estructural.[27] Aportando casos tangible para dar a conocer la diferenciación del género a nivel real como virtual.

3. Marco Teórico

3.1. Presentación de datos

La representación gráfica de datos es una herramienta clave para la investigación, ya que permite interpretar y comparar múltiples métricas de manera visual e intuitiva. La elección del tipo de gráfico se basa en la necesidad de mostrar simultáneamente diferentes dimensiones estructurales de las pistas.

3.1.1. Min-Max Scaling

Para normalizar los datos y permitir una comparación justa entre métricas de diferente naturaleza, se aplicó el método de *Min-Max Scaling*. Este procedimiento ajusta todos los valores al rango entre 0 y 1 (o, en este caso, de 1 a 10), preservando las relaciones proporcionales originales. Esto facilita la representación conjunta de todas las métricas en los diferentes tipos de gráficos analizados. [28]

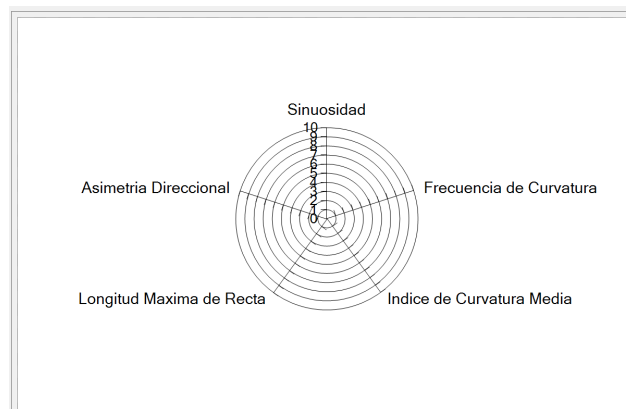
$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \times (10 - 1) + 1$$

donde:

- x : valor original de la métrica.
- x_{min} y x_{max} : valores mínimo y máximo del conjunto.
- x' : valor normalizado en la escala 1–10.

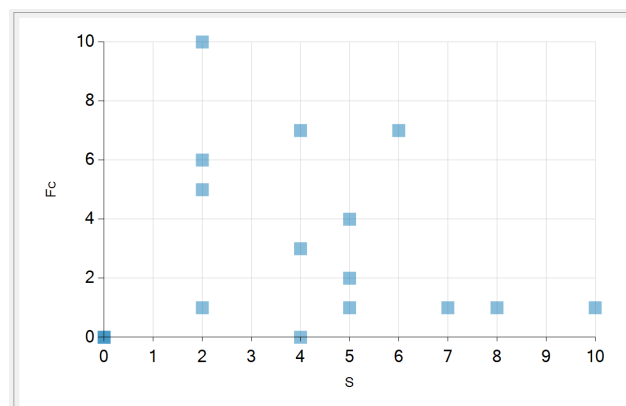
3.1.2. Radar Chart

El *Radar Chart*, o gráfico de radar, es una herramienta de visualización multivariable que representa cada métrica como un eje dispuesto radialmente. Cada pista se visualiza como una figura cerrada, permitiendo comparar de manera simultánea las características más relevantes. Este formato facilita la identificación de patrones, fortalezas o debilidades estructurales en un solo vistazo. [29]



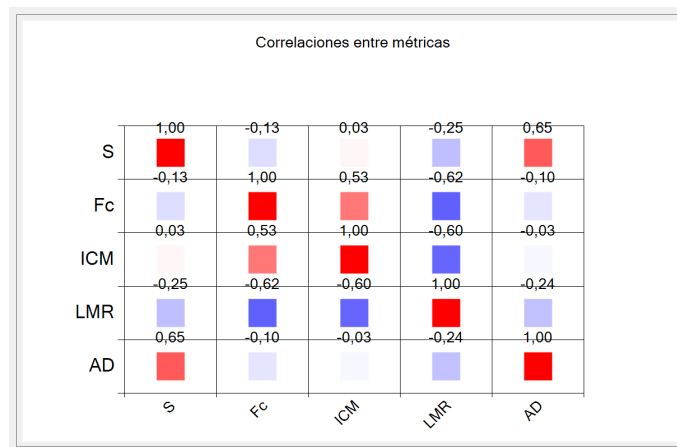
3.1.3. Tabla comparativa X-Y

Este tipo de representación permite seleccionar dos métricas específicas (por ejemplo, sinuosidad y frecuencia de curvatura) para realizar una comparación directa. En ella, cada pista se representa como un punto en el plano cartesiano, facilitando la detección de tendencias, relaciones o agrupaciones de comportamiento entre métricas particulares. Es una herramienta útil para identificar correlaciones parciales o contrastes directos entre variables específicas. [30]



3.1.4. Mapa de correlación (Heatmap)

El *Heatmap* o mapa de correlación visualiza el grado de relación entre todas las métricas evaluadas. Cada celda del mapa representa un coeficiente de correlación entre dos métricas, codificado por color según su intensidad. Este método permite observar rápidamente qué métricas presentan dependencias o comportamientos similares, ayudando a optimizar la selección de indicadores más relevantes para el análisis morfométrico general.[31]



3.2. Programación

En esta sección se detallan las herramientas, tecnologías y enfoques lógicos utilizados para el desarrollo del prototipo de análisis, incluyendo la forma en que se procesan, almacenan y visualizan los datos.

3.2.1. Plataforma y Lenguaje de programación

Para el desarrollo de esta investigación, se realizó dos aplicaciones de escritorio utilizando *Visual Studio* con lenguaje *C#*, debido a su robustez, ecosistema amplio y compatibilidad con entornos Windows. Esta elección facilita la manipulación de archivos, la integración con librerías gráficas y la implementación modular del sistema.

3.2.2. Procesamiento y almacenamiento de datos

El primer módulo del prototipo analiza los datos extraídos de las pistas de carrera y calcula las métricas morfométricas definidas. Los resultados se almacenan en archivos de texto plano con formato *.txt*, utilizando clases como *StreamWriter* y *File.WriteAllText()* del espacio de nombres *System.IO*. El formato es estructurado para permitir su posterior lectura e interpretación por el módulo visual.

3.2.3. Lectura y visualización de datos

El segundo módulo lee los archivos generados mediante *StreamReader* y *File.ReadAllLines()*, transformando los datos en estructuras adecuadas para su representación gráfica. Las métricas se visualizan mediante tres tipos de herramientas:

- **Radar Chart:** comparación global de múltiples métricas por pista.
- **Tabla comparativa X–Y:** análisis directo entre pares de métricas seleccionadas.
- **Mapa de correlación (Heatmap):** exploración visual de relaciones entre todas las métricas.

Estas visualizaciones ofrecen una comprensión integral del comportamiento morfométrico de las pistas, combinando precisión técnica y claridad visual.

3.2.4. Estructura modular y escalabilidad

El prototipo mantiene una arquitectura modular que separa el análisis de las métricas del componente visual, lo que permite incorporar nuevas métricas, formatos gráficos o fuentes de datos sin afectar la funcionalidad base. Esta estructura facilita la expansión futura del sistema permitiendo incluir nuevas métricas que podrían complementar los análisis.

4. Marco Metodológico

El presente estudio se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo con un alcance descriptivo y comparativo, orientado a caracterizar y analizar la estructura morfológica de pistas de carrera mediante métricas objetivas. Su diseño corresponde a un estudio no experimental y transeccional, ya que no se manipulan variables independientes y todas las mediciones se realizan en un único momento temporal. La naturaleza del trabajo es aplicada, pues se construye un marco analítico destinado a evaluar y comparar pistas tradicionales y generadas procedualmente.

4.1. Tipo y diseño de investigación

El enfoque cuantitativo permite operar sobre datos numéricos obtenidos a partir de mapas de vértices, lo cual facilita la aplicación de métricas geométricas y su posterior análisis mediante representaciones visuales. El alcance descriptivo del estudio se refleja en la caracterización detallada de las formas de las pistas, mientras que el carácter comparativo surge al examinar diferencias estructurales entre pistas de origen manual y procedural.

El diseño no experimental y transeccional es adecuado debido a que el estudio se limita a observar y analizar la geometría existente de cada pista sin intervenir ni modificar sus características. Este diseño permite establecer comparaciones válidas dentro del corpus seleccionado, preservando la integridad de los datos originales.

4.2. Corpus y unidades de análisis

El corpus está compuesto por un conjunto mixto de pistas provenientes de diversas fuentes. Cada pista se representa mediante un mapa de vértices que describe su

recorrido principal completo y constituye la unidad fundamental del análisis.

Esta representación espacial facilita la extracción de información geométrica como longitudes, variaciones angulares, índices de curvatura y proporciones internas, lo que permite aplicar métricas morfométricas interdisciplinarias de forma consistente en conjuntos de series.

4.3. Obtención de los trazados de las pistas

Para cada pista del corpus se obtuvo una representación base del recorrido, la cual varía según su origen. Este proceso se realizó mediante cuatro mecanismos principales:

- **Acceso directo a archivos internos (SuperTuxKart):** En el caso del videojuego de código abierto SuperTuxKart, fue posible extraer el trazado interno de cada pista a partir de sus archivos estructurales (`quads.xml` y `graph.xml`). Para ello se empleó *Blender* como entorno de soporte, utilizando un script en Python que lee la geometría base definida en los *quads*, calcula los centros de cada celda del recorrido y reconstruye el *edge-loop* principal indicado en el grafo de navegación.

Gracias a esta información, se generó automáticamente una *curve* dentro de Blender que representa el trazado central de la pista. Este procedimiento permite recuperar el recorrido con alta fidelidad respecto al diseño original.

- **Vectorización de minimapas (videojuegos comerciales):** Para los videojuegos comerciales cuyos archivos internos no son accesibles, el trazado de la pista se obtuvo mediante la vectorización de sus minimapas oficiales. Para ello se utilizó *Inkscape*, realizando un proceso de trazado manual que permite definir el recorrido como un camino (`path`) continuo compuesto por nodos editables. Una vez finalizado el trazado, el minimapa vectorizado se exportó en formato *SVG*, el cual fue posteriormente importado en *Blender*. Allí, el archivo se convirtió en una *curve*, permitiendo obtener el recorrido como una secuencia uniforme de vértices apta para el cálculo de métricas geométricas.
- **Exportación desde generadores procedurales:** En el caso de métodos como Convex Hull o X-UniY-Exp, el propio sistema generador proporciona un

trazado digital que puede exportarse como conjunto de puntos o polilíneas.

- **Exportación de pistas reales:** Se extrajo de un proyecto de código abierto en *github* donde se encuentran todas las pistas de carrera de la F1 por año en formato *geojson*[27]

El resultado de esta etapa es un trazado base que representa la pista de forma continua y completa, constituyendo la materia prima para su análisis geométrico posterior.

4.4. Traducción a mapas de vértices

Una vez obtenido el trazado base de cada pista, el siguiente paso consistió en su conversión a un mapa de vértices uniforme que permitiera realizar los cálculos morfométricos. Este proceso se llevó a cabo íntegramente dentro de Blender, utilizando scripts en Python para garantizar una extracción precisa y reproducible de los puntos que conforman cada recorrido.

Cada trazado fue importado o reconstruido como una curva espacial en Blender. Para las pistas obtenidas desde archivos internos, el recorrido ya correspondía a una geometría definida; mientras que las pistas vectorizadas desde minimapas requerían pasos adicionales. En estos casos, el archivo SVG importado debía convertirse a una curva editable y posteriormente a un objeto de tipo **MESH**. Este procedimiento permitió corregir irregularidades propias del vectorizado, tales como nodos redundantes, variaciones artificiales en la densidad del trazado o segmentos superpuestos. Además, fue necesario ajustar manualmente la continuidad de la curva, garantizando que el recorrido formara un solo contorno cerrado o abierto, según la estructura original de cada pista.

Una vez obtenida una geometría limpia, cada pista fue convertida a una *mall* *evaluada* para permitir la extracción directa de sus vértices mediante un script en Python. El procedimiento consistió en iterar sobre los vértices del objeto evaluado y exportar sus coordenadas x y y a un archivo de texto, preservando el orden espacial del recorrido. En el siguiente fragmento se muestra el mecanismo utilizado para la extracción.

```

1 | depsgraph = bpy.context.evaluated_depsgraph_get()
2 | eval_obj = obj.evaluated_get(depsgraph)

```

```
3 mesh = eval_obj.to_mesh()  
4  
5 for v in mesh.vertices:  
6     f.write(f"{v.co.x},{v.co.y}\n")  
7  
8 eval_obj.to_mesh_clear()
```

Listing 4.1: Extracción de coordenadas de vértices desde una malla evaluada en Blender

En los casos donde el trazado presentaba una densidad excesiva de puntos, se aplicaron refinamientos adicionales para equilibrar la distribución de vértices y evitar sesgos en las métricas posteriores.

Tras la exportación, todos los mapas de vértices se sometieron a un proceso de depuración y estandarización. Esto incluyó la corrección de discontinuidades, la eliminación de artefactos geométricos y la normalización espacial cuando fue necesario, preservando siempre la forma relativa del trazado original. El resultado final fue un conjunto homogéneo de recorridos representados como secuencias ordenadas de vértices, aptos para la aplicación directa de las métricas morfométricas utilizadas en la investigación.

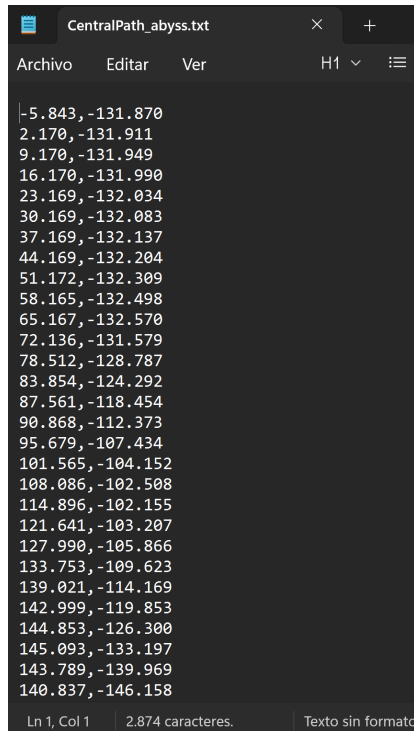


Figura 4.1: Mapa de vértices de una pista, donde cada columna, representa la coordenada x y y .

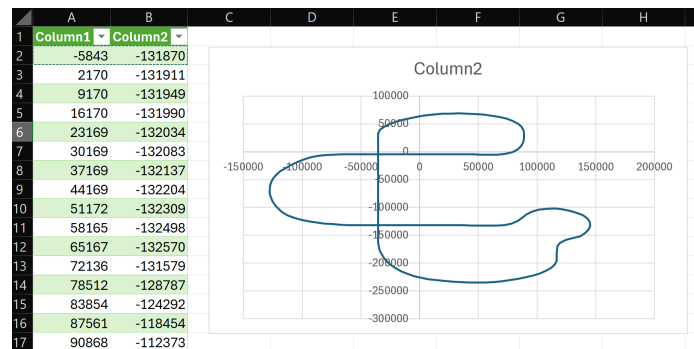


Figura 4.2: Visualización de la trayectoria de la pista conectando los vértices del mapa, mostrando el recorrido principal que se utilizará para el cálculo de métricas morfométricas.

4.5. Adaptación de métricas morfométricas a un modelo discreto de vértices

Una vez que cada pista fue representada como un mapa ordenado de vértices, fue necesario adaptar las métricas morfométricas seleccionadas a un modelo geométrico discreto. Las formulaciones originales de estas métricas provienen, en su mayoría, de enfoques continuos, donde las trayectorias se describen mediante curvas suaves. En el presente estudio, sin embargo, la geometría de las pistas se encuentra definida como una lista de vértices finita conectadas por segmentos consecutivos.

Esta discretización implica que magnitudes como la longitud, la curvatura y la direccionalidad no pueden calcularse mediante operadores diferenciales, sino que deben aproximarse a partir de relaciones geométricas entre vértices adyacentes. En consecuencia, las métricas fueron reformuladas para conservar su significado geométrico

original, expresándolas en términos compatibles con el sistema de mapas de vértices descrito previamente.

A continuación, se presentan las expresiones discretizadas utilizadas para cada métrica, junto con fragmentos representativos de su implementación computacional, con el objetivo de evidenciar el proceso de traducción desde su formulación original.

Sinuosidad

$$S = \frac{L_{\text{real}}}{D}$$

donde, en el modelo discreto,

- $L_{\text{real}} = \sum_{i=1}^{n-1} \|v_i - v_{i-1}\|,$
- $D = \|v_{n-1} - v_0\|.$

```

1 longitudReal += norma(v[i], v[i-1]);
2 distanciaRecta = norma(v[n-1], v[0]);
3 S = longitudReal / distanciaRecta;
```

Listing 4.2: Implementación discreta de la sinuosidad

Frecuencia de curvatura

$$F = \frac{N_c}{L_{\text{real}}}$$

La identificación de curvas se realiza evaluando el ángulo entre segmentos consecutivos en cada vértice intermedio:

$$\theta_i = \arccos \left(\frac{a \cdot b}{\|a\| \|b\|} \right)$$

Considerando una curva cuando θ_i supera un umbral angular definido.

```

1 angulo = acos(dot(a,b) / (norma(a)*norma(b)));
2 if (angulo > umbral) numCurvas++;
3 F = numCurvas / longitudReal;
```

Listing 4.3: Cálculo de la frecuencia de curvatura

Índice de curvatura media

$$K = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-2} \theta_i$$

Esta métrica se obtiene a partir de los mismos ángulos utilizados en la frecuencia de curvatura, promediándolos sobre el conjunto de vértices intermedios.

```

1 sumaAngulos += angulo;
2 K = sumaAngulos / (n - 2);

```

Listing 4.4: Cálculo de la curvatura media

Longitud máxima en línea recta

La longitud máxima en línea recta no posee una formulación analítica cerrada, por lo que se define de manera algorítmica como la mayor subsección consecutiva del recorrido en la que no se producen cambios angulares significativos.

```

1 if (angulo < umbral) temp += distancia;
2 else {
3     max = max(temp, max);
4     temp = distancia;
5 }

```

Listing 4.5: Identificación de tramos rectos

Asimetría direccional

$$A = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-2} d_{\perp}(i)$$

donde la distancia perpendicular de cada vértice intermedio a la recta definida por los extremos del recorrido se calcula como:

$$d_{\perp} = \frac{|ax + by + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

```
1 dist = abs(dyL*(x - x0) - dxL*(y - y0)) / norma(linea);  
2 suma += dist;  
3 A = suma / (n - 2);
```

Listing 4.6: Cálculo de la asimetría direccional

4.6. Arquitectura del sistema de análisis

Una vez definidas y adaptadas las métricas morfométricas al modelo discreto de vértices, fue necesario establecer un mecanismo sistemático que permitiera su aplicación consistente sobre múltiples pistas y conjuntos de datos. Con este propósito, se desarrolló un sistema de análisis estructurado en dos módulos independientes pero complementarios, orientados a separar el proceso de cálculo numérico de las métricas de su posterior análisis visual y comparativo.

Esta separación permite desacoplar la etapa de procesamiento geométrico de la etapa de interpretación, facilitando tanto la validación de los resultados obtenidos como la incorporación de nuevas métricas o métodos de visualización en futuras extensiones del sistema. Ambos módulos operan de manera secuencial sobre archivos de texto estructurados, asegurando una comunicación clara entre las fases de cálculo y análisis sin establecer dependencias directas entre los componentes.

4.6.1. Módulo de cálculo morfométrico

El módulo de cálculo morfométrico constituye el primer componente del sistema de análisis y es responsable del procesamiento geométrico de los mapas de vértices asociados a cada pista. Su entrada corresponde a una carpeta que contiene archivos de texto, donde cada archivo representa un recorrido mediante coordenadas x e y ordenadas secuencialmente. Una vez obtenidos los mapas de vértices correspondientes a cada pista, por series se someten a un proceso de estandarización con el fin de garantizar que todos los recorridos sean analizados bajo un mismo criterio geométrico.

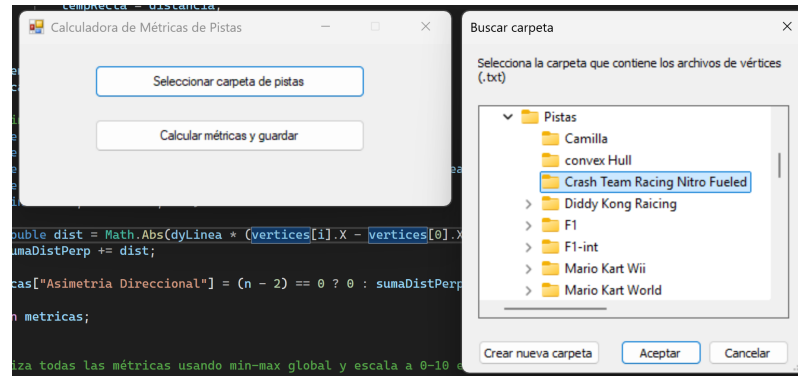


Figura 4.3: Interfaz del módulo de cálculo morfométrico para el procesamiento de pistas. El sistema procesa la totalidad de archivos seleccionados, permitiendo establecer valores mínimos y máximos globales.

A continuación, se aplica la normalización Min-Max, ajustando los resultados a la escala común de 0 a 10, posibilitando comparación homogénea entre pistas. Todos estos se almacenan en archivos de texto independientes.

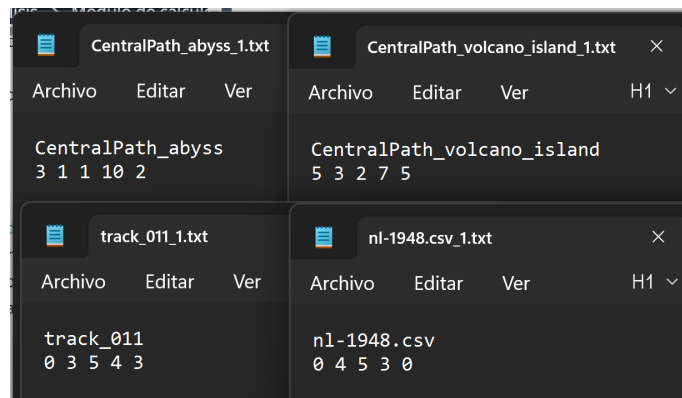


Figura 4.4: Ejemplos visuales de ejemplos de normalización de datos:
 Super Tux Kart: CentralPath_abyss_1 y CentralPath_volcano_island_1
 Procedural-X_UniY_Exp: track_011_1
 Formula1: nl-1948.

4.6.2. Módulo de visualización y comparación

El segundo módulo del sistema está orientado a la visualización y comparación de los resultados morfométricos generados por el módulo de cálculo. Este componente recibe como entrada los archivos de texto normalizados y transforma los datos en representaciones gráficas que facilitan el análisis comparativo entre pistas y conjuntos de pistas.

El módulo implementa los siguientes tipos de visualización:

- **Gráficos tipo *Radar Chart*:** permiten representar simultáneamente múltiples métricas.

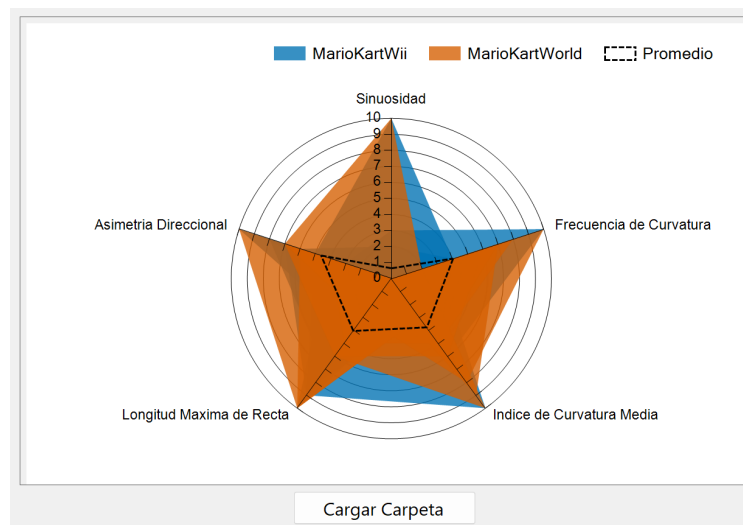


Figura 4.5: Ejemplo de visualización mediante *Radar Chart*, mostrando la comparación multivariable entre distintas pistas.

- **Comparaciones bidimensionales X–Y:** permiten explorar relaciones directas entre pares de métricas.

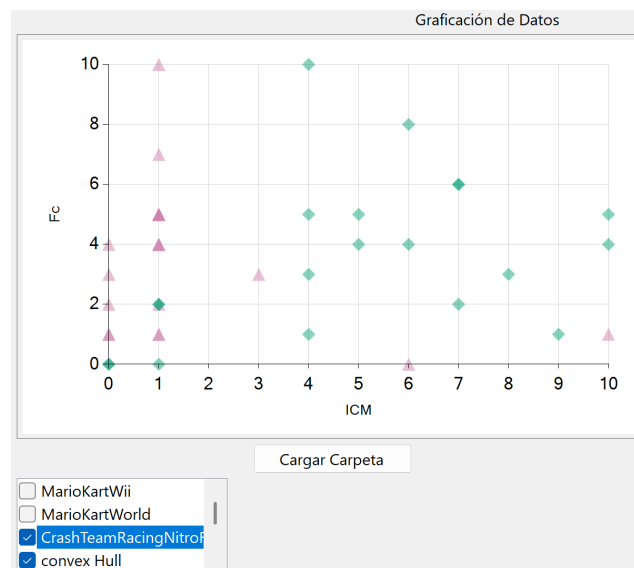


Figura 4.6: Ejemplo de comparación bidimensional entre dos métricas morfométricas.

- **Mapa de correlación (*Heatmap*):** permite analizar dependencias internas entre métricas.

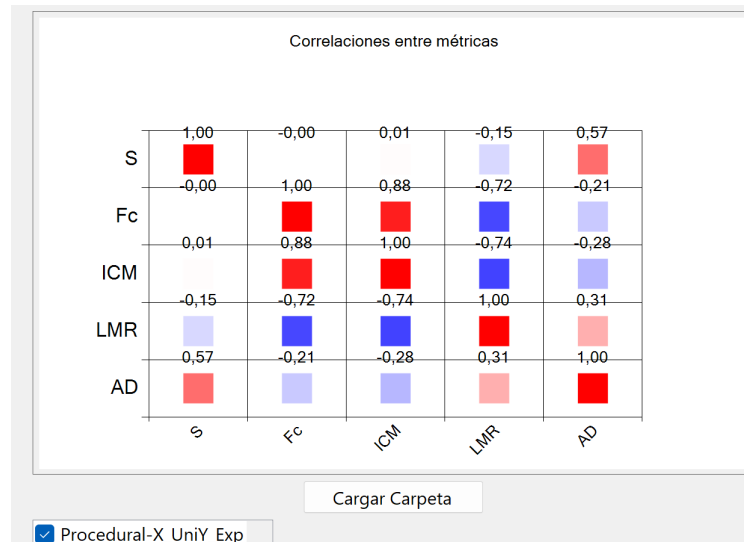


Figura 4.7: Mapa de correlación entre métricas morfométricas.

La selección de colores y formas en las distintas visualizaciones fue diseñada con el objetivo de maximizar la claridad visual y permitir una rápida distinción entre pistas y grupos, favoreciendo una interpretación eficiente de los resultados sin introducir ambigüedad visual.

4.7. Métodos de análisis

El análisis de los datos se basa en la interpretación conjunta de las métricas morfométricas ya calculadas y normalizadas.

En primer lugar, se realiza un análisis multivariable global, orientado a identificar patrones generales de configuración morfológica al considerar simultáneamente el conjunto completo de métricas. En segundo lugar, se desarrollan análisis entre pares de métricas, con el objetivo de explorar contrastes o dependencias específicas entre características geométricas particulares. Finalmente, se aplica un análisis de correlación para evaluar asociaciones internas entre las métricas y detectar posibles redundancias o comportamientos complementarios.

Estos enfoques permiten estructurar la interpretación de los resultados y sirven como base para el análisis presentado en el capítulo siguiente.

4.8. Procedimiento general

El procedimiento metodológico se organiza en una secuencia de etapas. En primer lugar, se selecciona y construye el corpus mixto de pistas. Posteriormente, cada trazado es extraído y traducido a un mapa de vértices mediante los procesos descritos en la sección anterior, asegurando una representación geométrica uniforme en todo el conjunto. Una vez obtenidos los mapas de vértices estandarizados, se realiza el procesamiento geométrico y se calculan las métricas morfométricas definidas para el estudio. Los valores obtenidos serán normalizados mediante el método Min-Max con el fin de permitir comparaciones homogéneas entre todas las pistas del corpus. y Finalmente, los resultados se visualizan y se interpretan mediante los distintos métodos analíticos establecidos, con el fin de evaluar diferencias estructurales entre pistas tradicionales, comerciales y procedurales.

Este flujo garantiza consistencia a lo largo de todo el proceso y sienta las bases para replicar o extender el análisis con nuevos conjuntos de pistas en investigaciones futuras.

5. Experimentos

Con el corpus de pistas recopilado y los módulos desarrollados para el procesamiento y visualización de datos, se realizaron una serie de experimentos orientados a analizar y comparar las características morfométricas de los trazados. Estos experimentos tienen como objetivo observar diferencias estructurales entre diseños de origen humano y procedural, así como evaluar el comportamiento de distintos enfoques de generación.

5.1. Corpus de pistas analizado

El corpus experimental se compone de un gran conjunto mixto de pistas. El conjunto se divide en las siguientes categorías:

- **Pistas comerciales:** Corresponden a trazados provenientes de videojuegos de distintas épocas y diferentes enfoques de *gameplay*, incluyendo títulos contemporáneos. Estas pistas representan diseños elaborados manualmente por diseñadores humanos.
- **Pistas procedurales:** Incluyen trazados generados mediante diversos métodos algorítmicos, caracterizados por distintas estrategias de generación y conexión de puntos, tales como enfoques convexos, cóncavos y variaciones estructurales propias de cada técnica.
- **Pistas de referencia real:** Corresponden a circuitos existentes en el mundo real, utilizados como punto de comparación adicional.

Este conjunto permite evaluar diferencias estructurales entre diferentes orígenes de diseño.

5.2. Preparación de datos para el experimento

Las pistas incluidas en el corpus experimental fueron procesadas mediante el sistema de análisis descrito en el capítulo metodológico. Cada trazado fue representado como un conjunto discreto de vértices, a partir del cual se calcularon las métricas morfométricas definidas previamente.

Los valores obtenidos fueron normalizados mediante un escalamiento Min-Max utilizando el módulo de cálculo desarrollado. Posteriormente, el módulo de graficación permitió la comparación directa entre pistas de distinto origen. Los datos resultantes constituyen la base sobre la cual se ejecutaron los experimentos descritos en las secciones siguientes.

5.3. Experimentos realizados

Con el objetivo de analizar el comportamiento morfométrico del corpus, se definieron tres tipos de experimentos, diferenciados según el tipo de análisis aplicado. En todos los casos, las pistas fueron consideradas en conjunto y diferenciadas según su origen para facilitar comparaciones.

5.3.1. Experimento 1: Comparación multivariada global

Este experimento consiste en una comparación multivariada de todas las pistas del corpus, considerando simultáneamente el conjunto completo de métricas morfométricas normalizadas. El propósito es observar la distribución global de los trazados en el espacio de características y detectar posibles agrupamientos, separaciones o solapamientos entre pistas de distinto origen.

5.3.2. Guía de interpretación de Radar Charts

Los radar charts presentados en esta sección visualizan perfiles morfométricos multivariados a partir de métricas normalizadas en una escala común. Cada eje representa una métrica específica:

- **Sinuosidad (S):** Eje superior. Valores altos indican trazados con mayor cantidad de curvas encadenadas.

- **Frecuencia de Curvatura (Fc):** Eje superior derecho. Representa la densidad de curvas por unidad de longitud del trazado.
- **Índice de Curvatura Media (Icm):** Eje inferior derecho. Describe el grado promedio de pronunciación de las curvas.
- **Longitud Máxima de Recta (Lmr):** Eje inferior izquierdo. Corresponde al tramo recto más largo presente en la pista.
- **Asimetría Direccional (Ad):** Eje superior izquierdo. Mide el desbalance entre giros hacia la izquierda y hacia la derecha.

Los perfiles tienen dos fuentes de información principal, que son las áreas donde el color destacada, que representa abundancia y la figura de puntos que representa el promedio entre valores. Adicionalmente, un perfil *expandido* (mayor área cubierta) indica trazados con valores extremos en múltiples dimensiones. En contraste, un perfil *compacto* sugiere un diseño más conservador y equilibrado.

La forma del polígono resultante permite analizar el balance interno entre las métricas, más allá de la magnitud individual de cada una.

5.3.3. Experimento 2: Comparaciones bivariadas

En este experimento se realizaron comparaciones de dos variables entre pares de métricas seleccionadas. Estas visualizaciones permiten analizar relaciones específicas entre características morfométricas y explorar diferencias más localizadas.

5.3.4. Guía de interpretación de Comparaciones bivariadas

Los gráficos bivariados muestran la relación entre pares de métricas morfométricas seleccionadas. Permiten analizar cómo una métrica influye o se relaciona con otra, así como detectar patrones o diferencias entre grupos de pistas.

- Cada punto representa una pista del corpus.
- Los colores y formas indican de la serie que pertenecen.
- La tendencia general, como la dispersión o pendiente de una recta, permite identificar correlaciones o dependencias entre las métricas.

- Agrupamientos o separaciones entre colores reflejan diferencias estructurales entre dominios.

5.3.5. Experimento 3: Análisis de correlación

El tercer experimento se centra en el análisis de correlación entre las métricas morfométricas calculadas. Su objetivo es identificar relaciones internas entre las variables y observar patrones estructurales comunes o divergentes dentro del corpus.

5.3.6. Guía de interpretación de Análisis de correlación

Este análisis utiliza matrices de correlación para examinar relaciones internas entre todas las métricas morfométricas:

- Cada celda representa la correlación entre dos métricas, con un valor de -1 (correlación negativa perfecta) a +1 (correlación positiva perfecta).
- Colores o gradientes visualizan la magnitud y dirección de la correlación, siendo rojo correlación positiva y azul correlación negativa.
- Correlaciones fuertes dentro de un grupo de métricas sugieren dimensiones dependientes de la estructura del trazado.

5.4. Procedimiento experimental

Los experimentos fueron ejecutados siguiendo un orden sistemático: primero se realizó la normalización de los datos, seguida por la generación de las visualizaciones multivariadas, luego las comparaciones bivariadas y, finalmente, el análisis de correlación. Este procedimiento permitió asegurar la coherencia entre los distintos experimentos y facilitar la comparación de los resultados obtenidos.

6. Resultados y Discusión

En este capítulo se analizan los resultados de los experimentos descritos en el capítulo anterior, considerando métricas individuales y análisis multivariados, cuya interpretación se realiza según la guía de lectura de gráficos definidas en el Capítulo 5.

6.1. Comparación multivariable de perfiles morfométricos

6.1.1. Radar Charts representativos

Pista Comercial: Mario Kart Wii

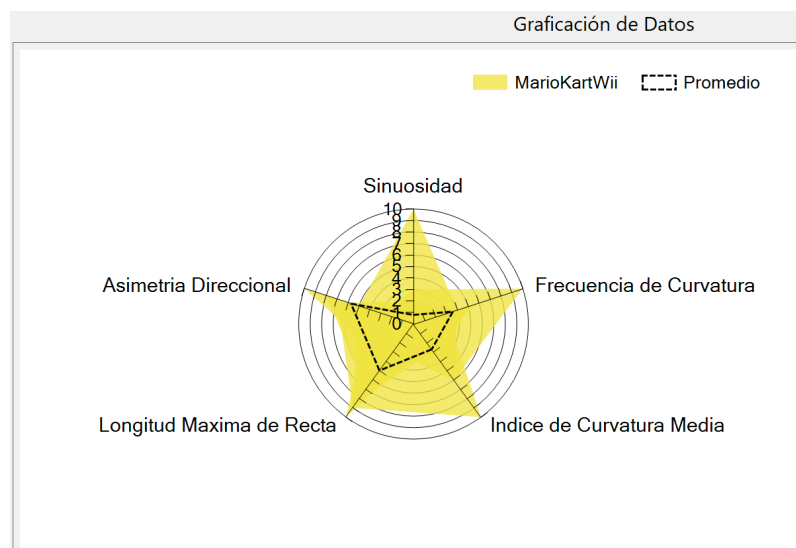


Figura 6.1: Perfil morfométrico multivariado de pistas comerciales de *Mario Kart Wii*. El área sombreada (amarilla) representa la envoltente de los perfiles individuales de las 20 pistas analizadas, evidenciando la dispersión y concentración de los valores por métrica.

Como se observa en la Figura 6.1, Se aprecia una alta variabilidad en sinuosidad y asimetría direccional, donde sus valores oscilan entre el mínimo 0 y el máximo 10, mientras que la frecuencia de curvatura y el índice de curvatura media presentan valores promedio más contenidos, con valores entre 3 y 4, reflejando un diseño orientado a maximizar la variedad y el dinamismo del recorrido.

Pista Procedural: Chaincode_Compleja

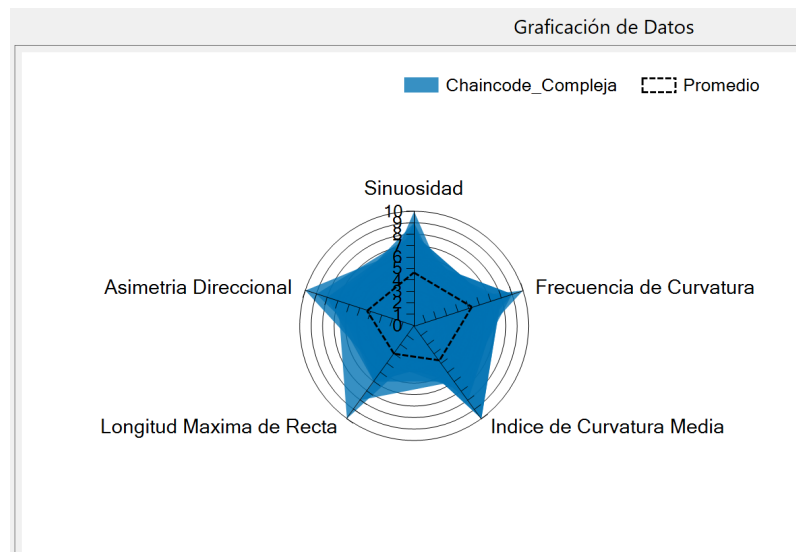


Figura 6.2: Perfil morfométrico multivariado de pistas generadas mediante el método procedural *Chaincode_Compleja*, El área sombreada (azul) representa el perfil individual de más de 100 casos generados con esta técnica.

El radar muestra valores altos pero más equilibrados entre métricas, todas rondando con valores entre 4-6, evidenciando una estructura geométrica regulada y una menor variabilidad en comparación con el diseño comercial.

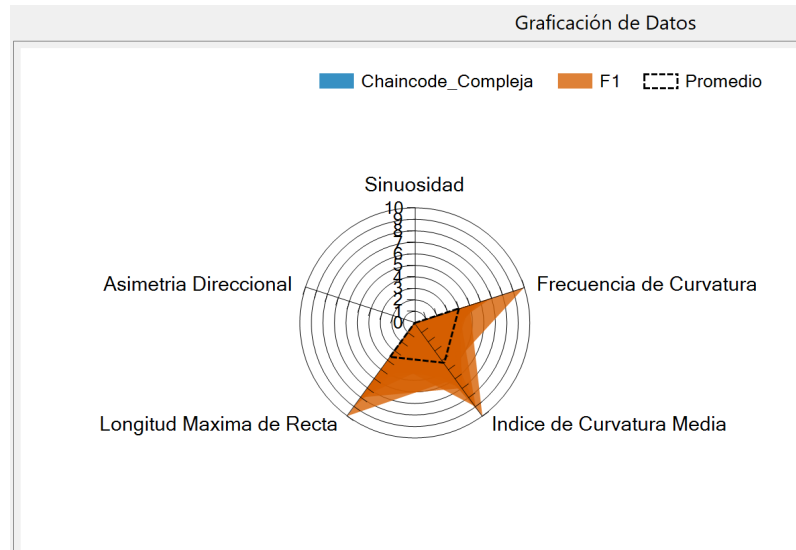
Pista real: Fórmula 1

Figura 6.3: Perfil morfométrico multivariado de circuitos reales de *Fórmula 1*, Donde el área sombreada (naranja) está cubierta por más de 30 pistas de la F1.

Se aprecia un perfil más concentrado, con baja sinuosidad y asimetría direccional, con valores iguales a 0, mientras que la Frecuencia de Curvatura, Índice de curvatura media y longitud máxima de recta, mantienen un valor promedio de 5, consistente con criterios de eficiencia, estabilidad y seguridad propias del diseño vial real.

La comparación multivariable de los perfiles morfométricos, mostrada en las Figuras 6.1, 6.2 y 6.3, evidencia diferencias claras entre los tres dominios analizados. Iniciando con las pistas comerciales, representadas por *Mario Kart Wii*, presentan perfiles amplios y extremos, caracterizados por una alta variabilidad geométrica orientada a maximizar la experiencia lúdica.

En contraste, el enfoque procedural *Chaincode_Compleja* genera perfiles igualmente complejos, pero más equilibrados y consistentes entre métricas, lo que sugiere una regulación estructural propia del modelo generativo y una menor diversidad entre trazados individuales.

Por su parte, los circuitos reales de *Fórmula 1* exhiben perfiles más concentrados y conservadores, coherentes con criterios de eficiencia, estabilidad y seguridad propios del diseño vial real.

En conjunto, el análisis multivariado confirma que el método de generación influye directamente en la organización interna de las métricas morfométricas, permitiendo distinguir entre diseños orientados a la experiencia lúdica, el enfoque de la generación

procedural y la optimización funcional del trazado real.

6.2. Comparación bivariada entre métricas

6.2.1. Relaciones entre sinuosidad y frecuencia de curvatura

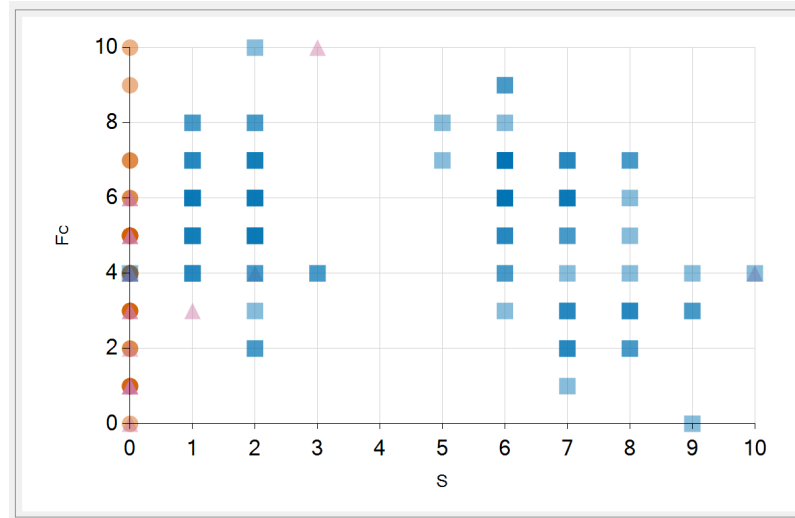


Figura 6.4: Relación bivariada entre sinuosidad y frecuencia de curvatura en pistas comerciales (triángulos rosados), procedurales (cuadrados azules) y reales (círculos naranjas). Se observa una mayor dispersión regulada en el modelo procedural (*Chaincode Compleja*), mientras que los casos comerciales y reales presentan mayor concentración con baja Sinuosidad, reflejando objetivos de diseño diferenciados. Como se observa en la Figura 6.4, esta comparación evidencia que el enfoque procedural tiende a regular la relación entre sinuosidad y frecuencia de curvatura, generando trazados con comportamientos geométricos más amplios. En contraste, los diseños comerciales y reales muestran una mayor variabilidad, compatible con decisiones de diseño con diferentes orientación, donde la sinuosidad mantiene valores bajo 3.

6.2.2. Curvatura media y longitud máxima de recta

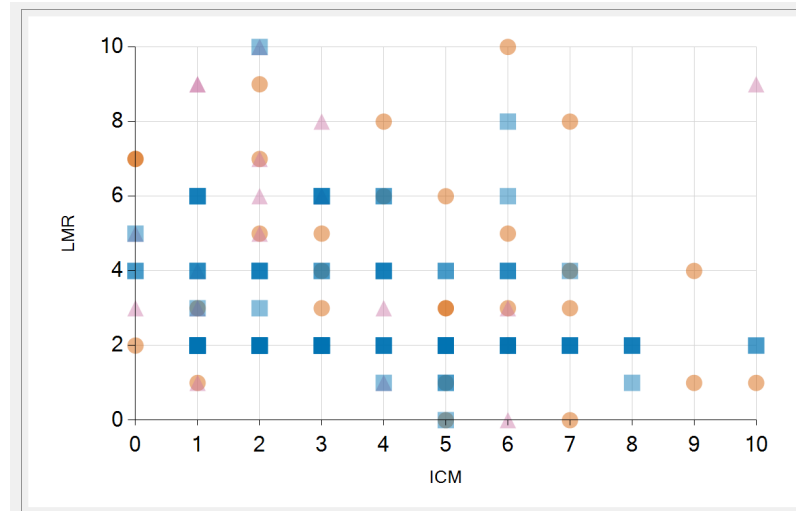


Figura 6.5: Manteniendo la misma iconografía, colores y simbologías, podemos presenciar una relación inversa entre curvatura media y longitud máxima de recta en pistas de distinto origen. Los trazados procedurales presentan una concentración bajo un nivel de Longitud máxima de recta, mientras que los circuitos comerciales y reales exhiben mayor dispersión en ambas métricas.

Los resultados refuerzan la existencia de un compromiso estructural entre curvatura y rectas largas, especialmente evidente en los modelos procedurales, donde la geometría se encuentra más acotada. En los casos comerciales y reales, esta relación es más flexible, permitiendo una mayor diversidad en la configuración del trazado.

6.2.3. Asimetría direccional y complejidad geométrica

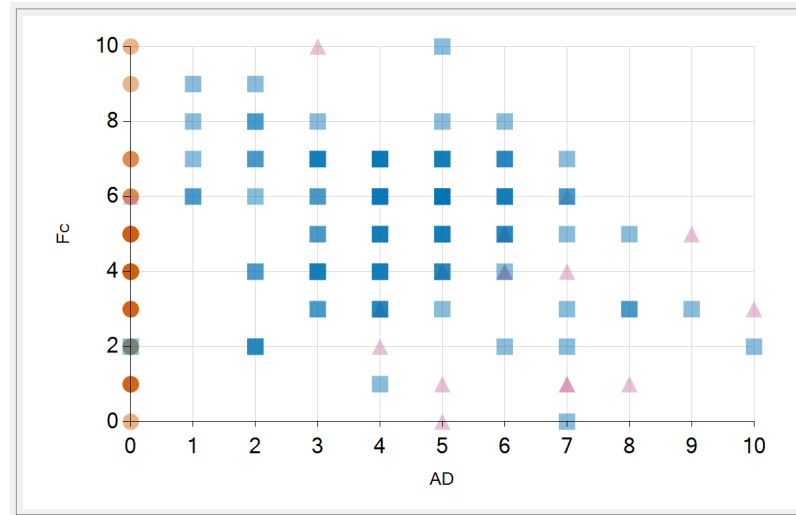


Figura 6.6: Bajo la misma iconografía, se presencia la siguiente relación entre asimetría direccional y frecuencia de curvatura. Las pistas comerciales presentan mayores niveles de asimetría, mientras que el enfoque procedural mantiene valores intermedios, reflejando un control geométrico más regular.

Esta relación permite distinguir con claridad los enfoques de diseño. Las pistas comerciales utilizan la asimetría direccional como recurso expresivo, mientras que el modelo procedural limita este rasgo para mantener coherencia geométrica, cabe destacar que la comercial mantiene un rango de Asimetría direccional desde el 3 en adelante, mientras que el procedural se permite con valores más bajos. Los circuitos reales priorizan baja asimetría, manteniendo valores de 0, alineándose con criterios de estabilidad y repetibilidad.

6.3. Análisis global de correlación

Pista Comercial: Mario Kart Wii

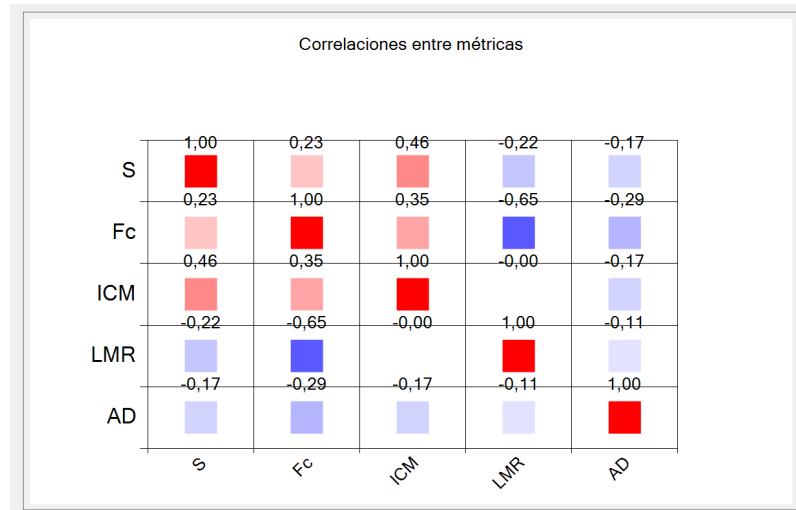


Figura 6.7: Mapa de correlación entre métricas morfométricas, tenemos las pistas comerciales de *Mario Kart Wii*. Se observan correlaciones moderadas y distribuidas, con baja dependencia estructural entre métricas, lo que sugiere un diseño orientado a decisiones lúdicas más flexibles.

Pista procedural: Chaincode_compleja

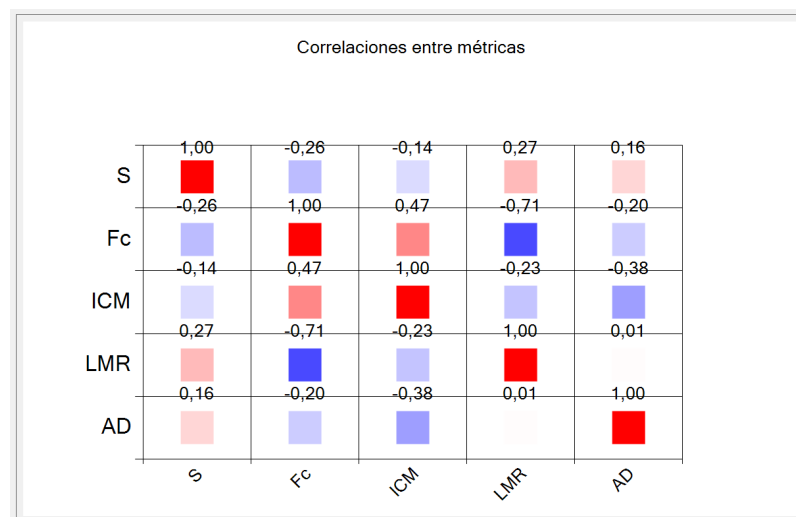


Figura 6.8: Mapa de correlación entre métricas morfométricas, en pistas generadas proceduralmente mediante *Chaincode_Compleja*. Se evidencian correlaciones más intensas y estructuradas, destacando relaciones negativas fuertes entre frecuencia de curvatura y longitud máxima de recta, propias de un modelo generativo regulado.

6.3.1. Heatmap de métricas morfométricas

El análisis de correlación, visualizado en las Figuras 6.7 y 6.8, confirma diferencias estructurales claras entre los dominios de diseño analizados. En el enfoque procedu-
ral, las métricas presentan relaciones de dependencia más marcadas, reflejando un
comportamiento geométrico interconectado y coherente con un modelo generativo
basado en reglas.

En contraste, los trazados comerciales exhiben correlaciones más débiles y distri-
buidas, indicando una mayor independencia entre métricas y un uso más flexible de
los recursos geométricos en función de la experiencia del jugador.

6.3.2. Diferencias estructurales entre dominios

La comparación entre dominios revela diferencias claras en la organización inter-
na de las métricas. El enfoque procedural presenta una estructura más rígida, donde
el incremento de un rasgo geométrico suele implicar la compensación de otro, refle-
jando un comportamiento sistémico y coherente del modelo generativo. En el diseño
comercial, en cambio, las métricas mantienen una mayor independencia relativa, lo
que evidencia decisiones de diseño orientadas a la experiencia del jugador más que a
restricciones geométricas estrictas. Cabe destacar que la relación de longitud máxi-
ma de recta y la frecuencia de curvatura en ambos casos mantienen una relación
negativa alta, con valores entre -0.65 a -0.71.

7. Conclusiones y Trabajo Futuro

7.1. Conclusiones

Este estudio confirma que las **métricas morfométricas interdisciplinarias** pueden aplicarse eficazmente para analizar la estructura de pistas de videojuegos de carrera y diferenciar entre trazados generados procedualmente y diseñados manualmente, respondiendo directamente a la pregunta de investigación.

El **marco morfométrico** permitió identificar patrones cuantificables entre dominios: las pistas generadas procedualmente tienden a mostrar una estructura más homogénea y relaciones de dependencia más fuertes entre métricas (por ejemplo, alta correlación negativa entre frecuencia de curvatura y longitud máxima de recta, $r=-0.71$), mientras que los trazados comerciales presentan mayor variabilidad y métricas más independientes, reflejando decisiones de diseño intencionadas para la experiencia del jugador. La comparación con pistas reales de Fórmula 1 mostró que algunas métricas seleccionadas capturan aspectos estructurales presentes en diseños reales.

En conjunto, los resultados demuestran que el análisis morfométrico permite caracterizar de manera objetiva la diversidad y complejidad de los trazados, sirviendo como herramienta para evaluar generadores procedurales, comparar estilos de diseño y orientar futuros desarrollos en generación de pistas de carreras digitales.

7.2. Aportes del estudio

Este trabajo realiza varias contribuciones al análisis de trazados de carreras digitales. En primer lugar, se propone un **marco morfométrico cuantitativo** que permite caracterizar de manera objetiva la estructura geométrica de los circuitos, adaptando métricas provenientes de geomorfología, ingeniería vial y análisis de trayectorias a representaciones discretas de vértices. Este marco se valida sobre un **corpus multimodal de pistas** que incluye más de 100 circuitos de videojuegos comerciales (1997-2025), diversas pistas generadas mediante métodos procedurales, y 75 años de trazados reales de Fórmula 1 (1948-2024), constituyendo un recurso útil para futuras investigaciones.

En segundo lugar, se implementan **generadores procedurales**, tanto cinco métodos de la literatura (Convex Hull, Chain Code, Camilla, entre otros) como dos métodos originales desarrollados en este proyecto (X-UniY-Exp e Ingram T1/T2), junto con scripts reproducibles de vectorización en Blender y Python que permiten transformar minimapas en datos geométricos. Esta integración asegura un pipeline completo y reutilizable desde la generación de trazados hasta el cálculo de métricas y visualización, facilitando evaluaciones comparativas y la extensión del trabajo a nuevos juegos o generadores.

Finalmente, se aplican **análisis multivariados y de correlación** que permiten identificar dependencias estructurales entre métricas, caracterizar estilos de diseño y patrones de generadores procedurales, y establecer futuros métodos. Además, se desarrolla un **software de análisis exploratorio** con módulos de cálculo de métricas y visualización interactiva, proporcionando una herramienta práctica para diseñadores y desarrolladores interesados en la evaluación cuantitativa de pistas.

7.3. Limitaciones

El presente estudio presenta varias limitaciones que conviene considerar:

Metodológicas: El análisis se restringe a la geometría 2D, sin considerar elevación, ni ancho de pista. Solo se exploró un subconjunto de métricas morfométricas posibles, con los métodos que se tuvieron al alcance.

Del corpus: El corpus podría ser más balanceado en proporciones, siendo las comerciales en comparación a las procedurales una diferencia en gran cantidad por conjunto.

De validación: No se realizaron estudios con jugadores ni se consultó con diseñadores profesionales, lo que podría permitir conocer diferencias durante el *Gameplay*.

De generalización: Los resultados aplican a pistas cerradas y podrían no extrapolarse a carreras punto-a-punto.

7.4. Trabajo futuro

Los hallazgos de esta investigación abren varias puertas de trabajo futuro, que se describen a continuación.

7.4.1. Ampliación de métricas geométricas

Se podría incorporar un conjunto más amplio de métricas para capturar aspectos de la forma de las pistas no considerados en este estudio, como Longitud total de trazado, variación de anchura del recorrido o cualquier métrica que estuviera fuera de los alcances actuales, enriqueciendo el análisis cuantitativo.

7.4.2. Extensión a modelos tridimensionales

Ampliar el análisis a modelos 3D permitiría incluir métricas verticales críticas para la experiencia de juego, como elevación, pendiente y peralte en curvas, ofreciendo una visión más completa de la estructura de los trazados.

7.4.3. Expansión del corpus de pistas y generadores

Resulta recomendable aumentar el número de pistas analizadas, incorporando más videojuegos y distintos algoritmos de generación procedural, para mejorar la representatividad del estudio.

7.4.4. Automatización del análisis

Optimizar y automatizar el proceso de vectorización y cálculo de métricas facilitaría la aplicación del marco a grandes volúmenes de datos y futuros estudios comparativos.

Glosario

Generación procedural: Técnica computacional que permite crear contenido automáticamente sin intervención manual directa, como mapas, niveles o terrenos en videojuegos.

Videojuegos de carrera: Género de videojuegos centrado en competiciones de velocidad, generalmente en vehículos como autos o motos, donde gana quien cruza primero la meta.

Subgénero *Kart*: Variante de los videojuegos de carrera caracterizada por la reducción de elementos de conducción, pistas poco convencionales, personajes caricaturescos y elementos como potenciadores u obstáculos.

Potenciador: Elemento interactivo dentro del juego que otorga ventajas temporales al jugador, como velocidad extra o invulnerabilidad.

Circuito: Recorrido de una pista de carreras.

Morfometría: Estudio cuantitativo de formas y dimensiones de objetos.

Métrica interdisciplinaria: Métrica adoptada desde otras disciplinas científicas (como geografía o biología) para su aplicación en contextos distintos, como el análisis de videojuegos.

Evaluación cuantitativa: Enfoque de medición, análisis y evaluación que utiliza datos numéricos y estadísticos.

Corpus de pistas: Conjunto estructurado de circuitos provenientes de diversas fuentes (videojuegos comerciales, generadores y pistas reales) usado para análisis comparativo.

Pista procedural: Circuito generado automáticamente por algoritmos sin diseño manual directo.

Pista manual: Circuito diseñado de forma artesanal por un diseñador humano, sin automatización.

Geomorfología: Rama de la geografía y geología que estudia la forma de la superficie terrestre

Ingeniería vial: Rama de la ingeniería civil, estudia diseño, construcción y gestión de infraestructura de transporte.

Análisis de contorno: Técnica versátil que analiza, detecta y representa formas y límites.

Ingeniería de transporte: Diseño, operación y administración de cualquier instalación de transporte, como movimiento seguro, conveniente y económico.

Geomática: Ciencia que sirve para expresar integración sistemática de técnicas y metodologías de adquisición.

Análisis de trayectoria: Método de estudiar caminos o secuencias de objetos, personas o eventos.

Heurística: Técnica en programación que permite obtención de soluciones óptimas a problemas.

Módulo: En programación se refiere a una parte independiente y reutilizable, diseñado para realizar una tarea específica.

Heterogéneas: Compuesto de elementos muy distintas o variadas entre si.

Base empírica: Que se origina o se basa en la observación o experiencia.

minimapas: Versión simplificadas del recorrido que sirven para orientar al jugador.

Derrape: Técnica de conducción en la que el vehículo desliza lateralmente para tomar curvas cerradas con mayor velocidad o control.

Vectorización: Proceso de convertir una imagen de pixeles a un gráfico vectorial, utilizando fórmulas matemáticas para definir formas, líneas y curvas.

Semilla de puntos: En la programación, las semillas son un número inicial que fija la secuencia de números pseudoaleatorios.

Parametrizar: Describir o estudiar algo mediante parámetros.

Convexo: Curvado hacia afuera.

Chain Code: Algoritmo de codificación que representa formas mediante secuencias de direcciones, útil para digitalizar contornos en imágenes y aplicarlos en motores gráficos.

Secuencia discreta: Secuencia multidimensional representada por un índice vectorial, donde cada índice se ejecuta sobre un conjunto finito de valores.

Diagramas de Voronoi: Partición geométrica del espacio en regiones (Celdas) donde cada región contiene los puntos más cercanos de un sitio.

Curva de Bezier: Curva suave y controlada usada en gráficos por ordenador para dibujar formas.

Normalización: Proceso de establecer y aplicar estándares o normas comunes para ordenar comportamiento de datos.

Visual Studio: Entorno de desarrollo integrado (IDE) de Microsoft utilizado para crear aplicaciones de escritorio, web y móviles, con soporte para C# y otras tecnologías.

C#: Lenguaje de programación orientado a objetos desarrollado por Microsoft, ampliamente utilizado en entornos Windows para desarrollo de software y prototipos.

StreamWriter/StreamReader: Clases del espacio de nombres *System.IO* en C#, utilizadas para la escritura y lectura de archivos de texto.

.txt: Formato de archivo de texto plano, legible por humanos, útil para almacenar datos estructurados simples que serán procesados posteriormente.

Estructura modular: Principio de diseño de software que separa componentes funcionales en unidades independientes, facilitando la escalabilidad, mantenimiento y extensión del sistema.

Traseccional: Recolectan datos en un momento único.

Archivos estructurales: Archivos que organizan los datos en filas y columnas.

Script: Archivo de texto con instrucciones para un intérprete.

Quads: Árboles de datos.

Edge-loop: Secuencia continua de aristas en modelos 3d que forman contornos.

Pipelines: Referente a datos, se refiere a un flujo de trabajo automatizado que mueve y procesa datos desde una o varias fuentes hasta un destino final.

Nodos: Puntos de conexión de una red o sistema.

Discretización: Proceso de transformar datos continuos o de rango infinito en un conjunto finito y contable de categorías o intervalos.

iconografía: Sistema de imágenes simbólicas

Bivariada: Estudio de relación entre dos variables simultáneamente para ver si hay un vínculo entre ellas.

Diseño lúdico: Estrategia de diseño que busca impactar positivamente a través del espacio.

Experiencia lúdica: Todo aquello que se relaciona con el juego, la recreación, el ocio, etc.

Bibliografía

- [1] Elizabeth A. Matthews and Brian A. Malloy. Procedural generation of story-driven maps. In *2011 16th International Conference on Computer Games (CGAMES)*, pages 107–112, 2011.
- [2] Fabian Behrens. Procedural race track generation for domain randomization. Technical Report Technical Reports in Computing Science No. CS-01-2020, University of Applied Sciences Kempten, Faculty of Computer Science, Jul. 2020. Preprint, not peer-reviewed.
- [3] Ying Xiong. Racing line optimization. Master’s thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2010. Disponible en: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/64669/706825301-MIT.pdf>.
- [4] Erik Jhones F. do Nascimento, Filipe A. Lira, Tassiana M. Castro, Ana Carolina S. Abreu, and Amauri H. Souza. Procedural generation of isometric racetracks using chain code for racing games. In *SBC Proceedings of SBGames 2021*, 2021. Disponible en: <https://www.sbgames.org/proceedings2021/ComputacaoFull/217347.pdf>.
- [5] Davide Pons. Trackscad - computer assisted track design tool for racing games. Master’s thesis, Politecnico di Milano, 2021.
- [6] Daniele Loiacono, Luigi Cardamone, and Pier Luca Lanzi. Automatic track generation for high-end racing games using evolutionary computation. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 3(3):245–259, 2011.
- [7] Oshane O. Thomas, Hongyu Shen, Ryan L. Raaum, William E. H. Harcourt-Smith, John D. Polk, and Mark Hasegawa-Johnson. Automated morphological phenotyping

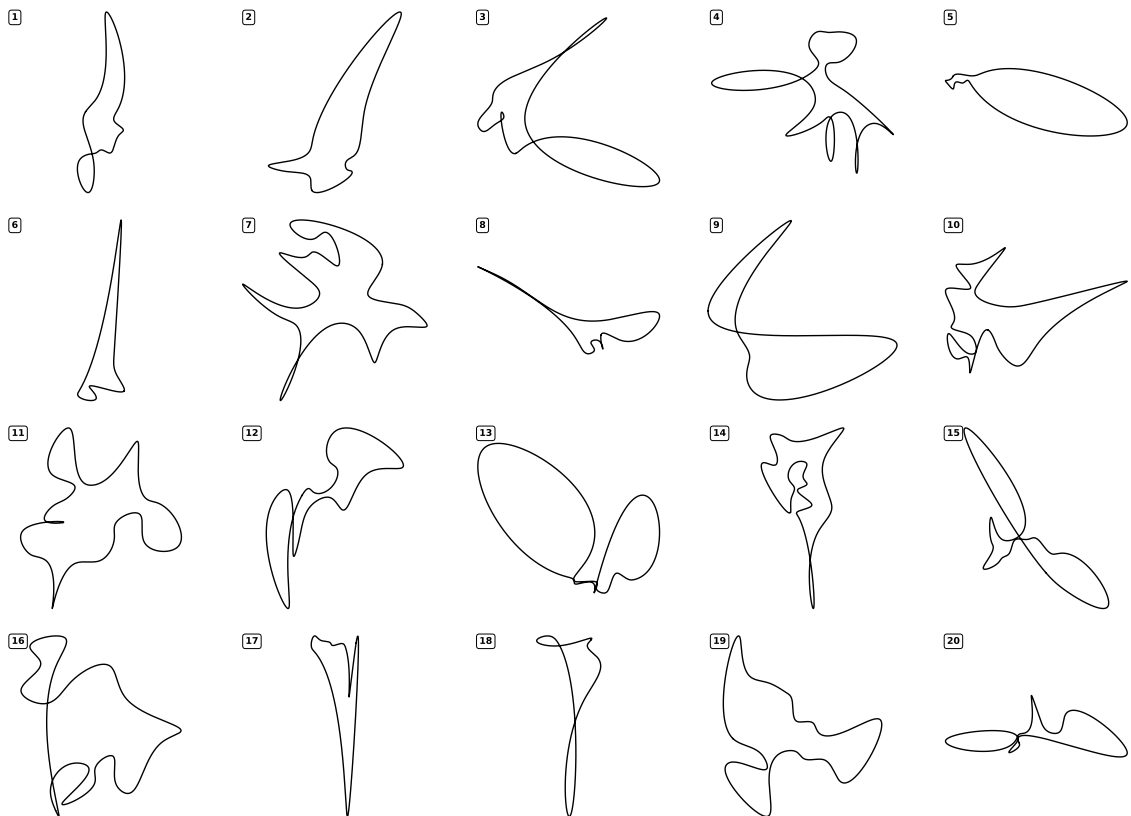
using learned shape descriptors and functional maps: A novel approach to geometric morphometrics. *PLOS Computational Biology*, 19(1):e1009061, 2023.

- [8] Lukáš Brůha and Jan Kolář. A procedural footprint enhancement of global topographic surface with multiple levels of detail. *International Journal of Digital Earth*, 13(4):527–545, 2020.
- [9] Atlas. Sinuosity - gis use cases, 2025.
- [10] Adam Franco. How it works – curvature, 2025.
- [11] Mehran Maghsoudi, Seyyed Mohammad Zamanzadeh, Mojtaba Yamani, and Abdolhossein Hajizadeh. Morphometric assessment of meandering river in arid region using improvement model (case study: Maroon river). *Journal of Water Resource and Protection*, 9(4):358–377, March 2017.
- [12] Vincent Labatut. Continuous average straightness in spatial graphs. *Journal of Complex Networks*, 6(2):269–296, April 2018.
- [13] Alvis Finotello, Andrea D’Alpaos, Manuel Bogoni, Massimiliano Ghinassi, and Stefano Lanzoni. Remotely-sensed planform morphologies reveal fluvial and tidal nature of meandering channels. *Scientific Reports*, 10(54):1–12, January 2020.
- [14] Crash team racing nitro-fueled, 2019. Videojuego.
- [15] Diddy kong racing, 1997. Videojuego.
- [16] Mario kart wii, 2008. Videojuego.
- [17] Mario kart world, 2025. Videojuego.
- [18] Sonic riders: Zero gravity, 2008. Videojuego.
- [19] Super tux kart. <https://supertuxkart.net>, 2024. Videojuego de código abierto.
- [20] Luigi Cardamone, Daniele Loiacono, and Pier Luca Lanzi. Interactive evolution for the procedural generation of tracks in a high-end racing game. In *Proceedings of the 13th Annual Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO ’11)*, pages 395–402, Dublin, Ireland, Jul. 2011. ACM.

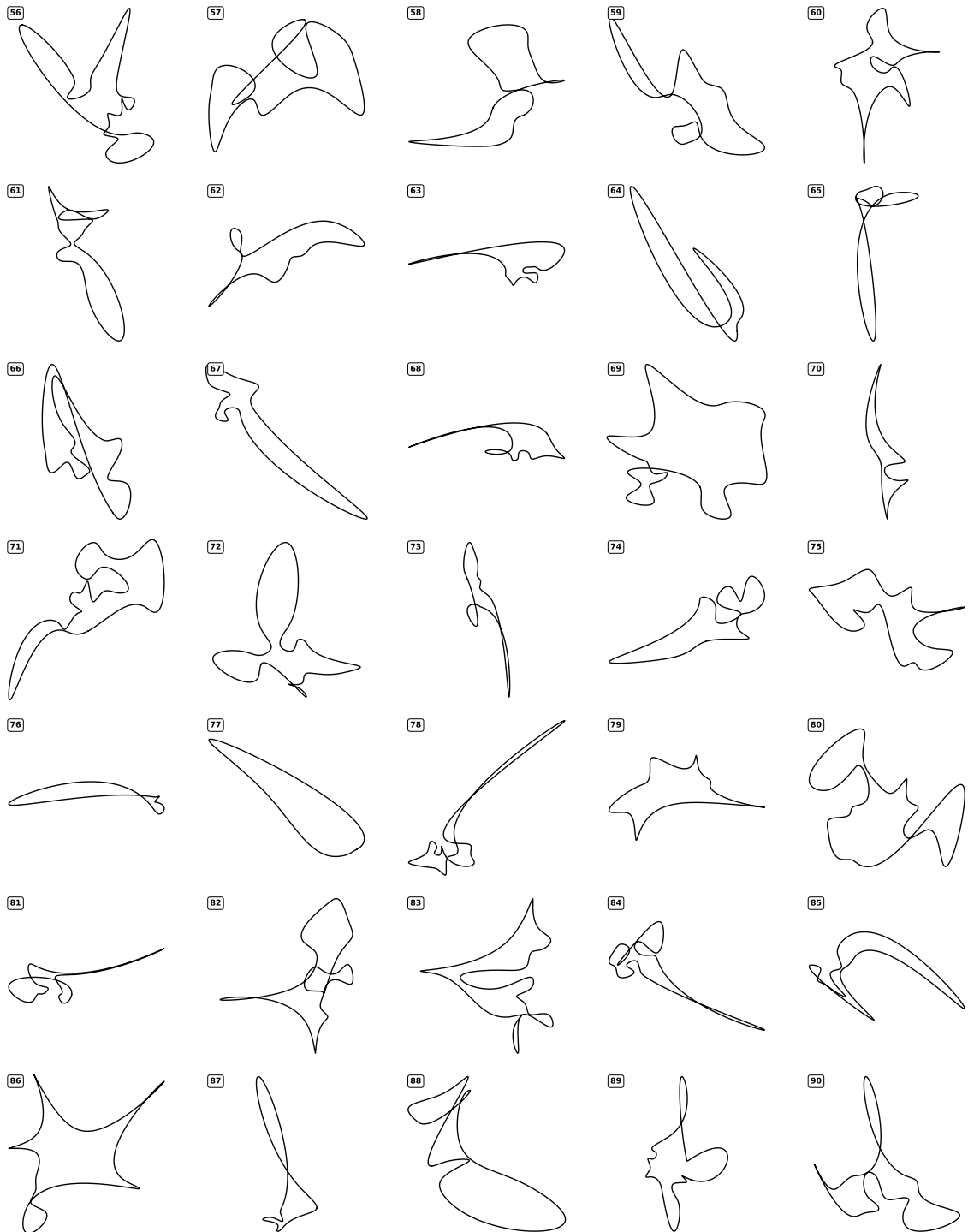
- [21] Hafizh Adi Prasetya and Nur Ulfa Maulidevi. Search-based procedural content generation for race tracks in video games. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 8(4):775–787, Dec. 2016.
- [22] Tai-Yun Chen, Hung-Wei Hsu, Wen-Kai Tai, and Chin-Chen Chang. An automatic race track generating system. In Anton Nijholt, Teresa Romão, and Dennis Reidsma, editors, *Advances in Computer Entertainment (ACE 2012)*, volume 7624 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 167–181, Berlin, Heidelberg, 2012. Springer.
- [23] Gustavo Maciel. Generating procedural racetracks, 2013. Accedido el: 2025-06-15.
- [24] Petr Šimůnek, David Šosvald, Martin Kahoun, and Vojtěch Černý. Controllable procedural generation of race track surroundings for iterative level design. In *2025 IEEE Conference on Games (CoG)*, pages 1–8, 2025.
- [25] Luca Garattoni. Procedural engine for sim racing track generation: The basic roadmap, July 2015. LinkedIn.
- [26] Lasse Henrich and Falko Kötter. From generation to gameplay: Authoring race tracks with repulsive curves. *IEEE Transactions on Games*, 17(4):923–932, 2025.
- [27] Tomo Bacinger, Eric Bradley, and Finn Lawrence. f1-circuits: A repository of Formula 1 circuits in GeoJSON format. <https://github.com/bacinger/f1-circuits>, 2025. GitHub repository.
- [28] scikit-learn developers. *MinMaxScaler — documentación de scikit-learn 1.7.0*. scikit-learn, 2025.
- [29] Jaspersoft. What is a radar chart? *Cloud Software Group, Inc*, 2024.
- [30] Esri. Gráfico de dispersión—arcgis allsource — documentación. <https://doc.arcgis.com/es/allsource/latest/analysis/charts/scatter-plot.htm>, 2025. Documentación técnica oficial.
- [31] Domingo F. Rasilla. Tema 3: Relación entre variables cuantitativas. https://personales.unican.es/rasillad/docencia/G14/TEMA_3/relacion_entre_variables_cuantitativas.html, December 2023. Material docente, Universidad de Cantabria.

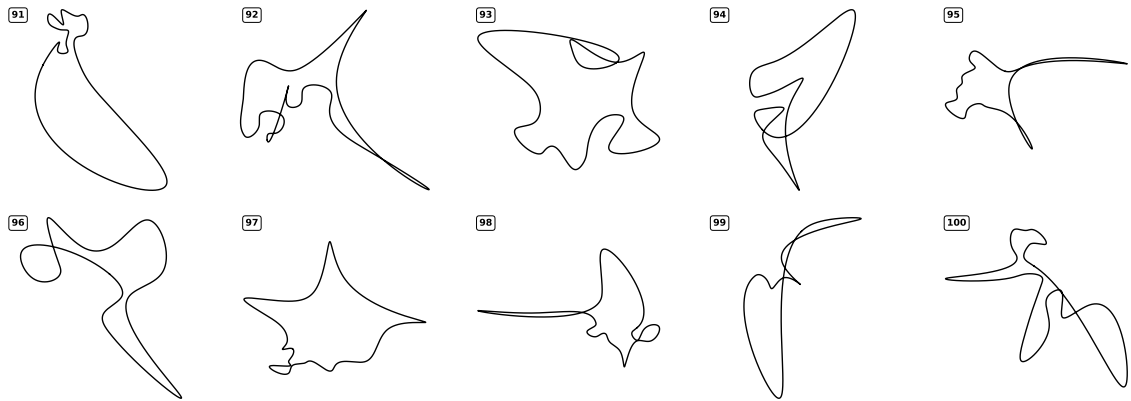
A. Race Track Outlines Appendix

Camilla (100 tracks)

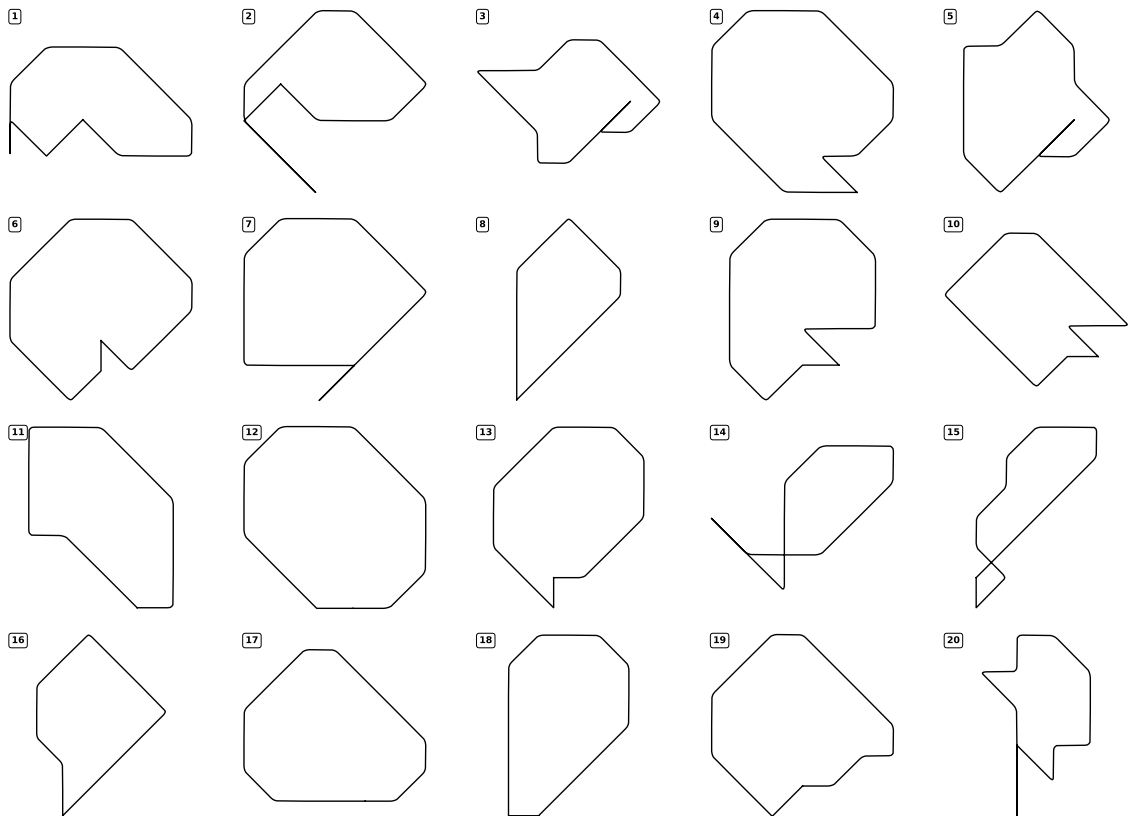


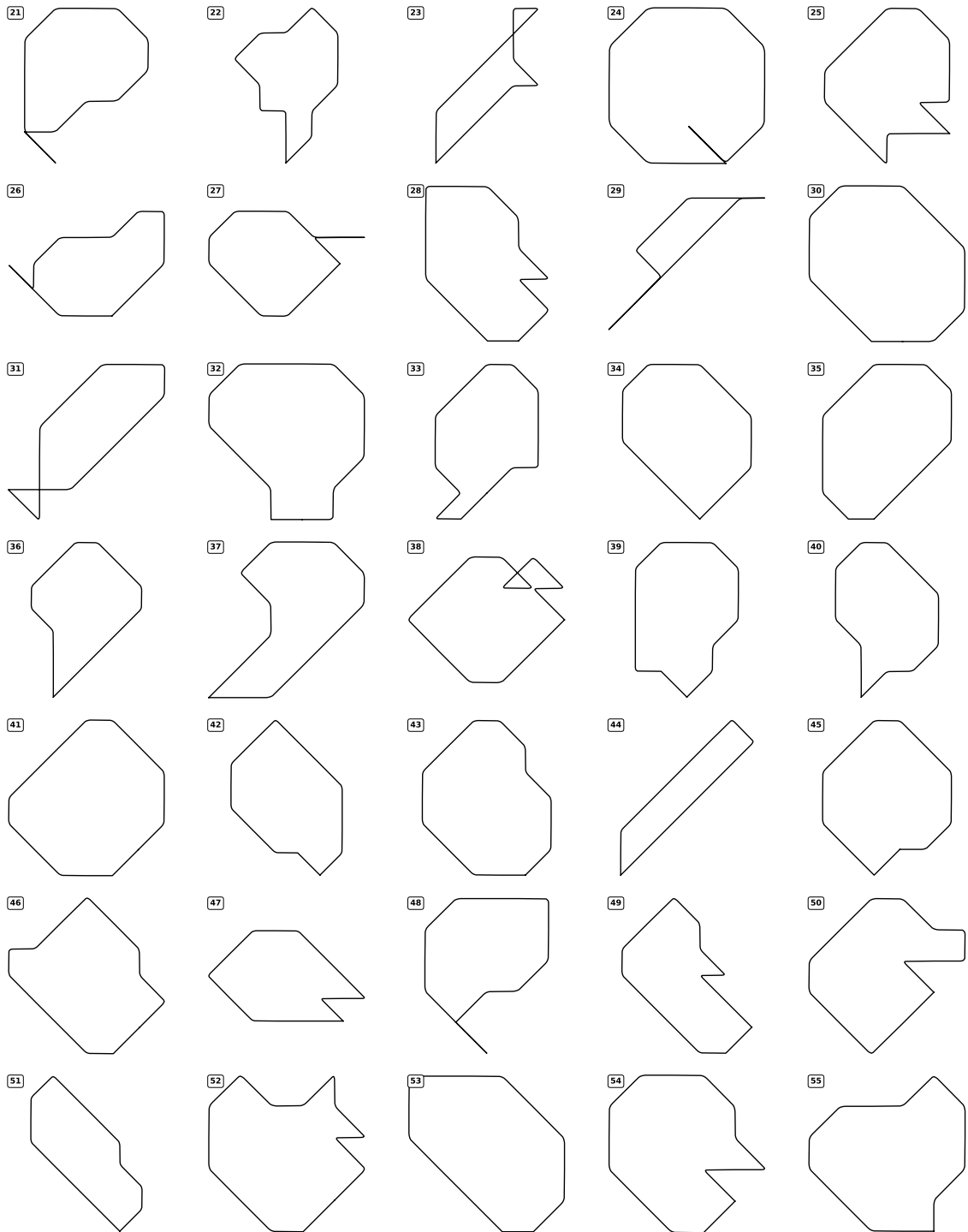


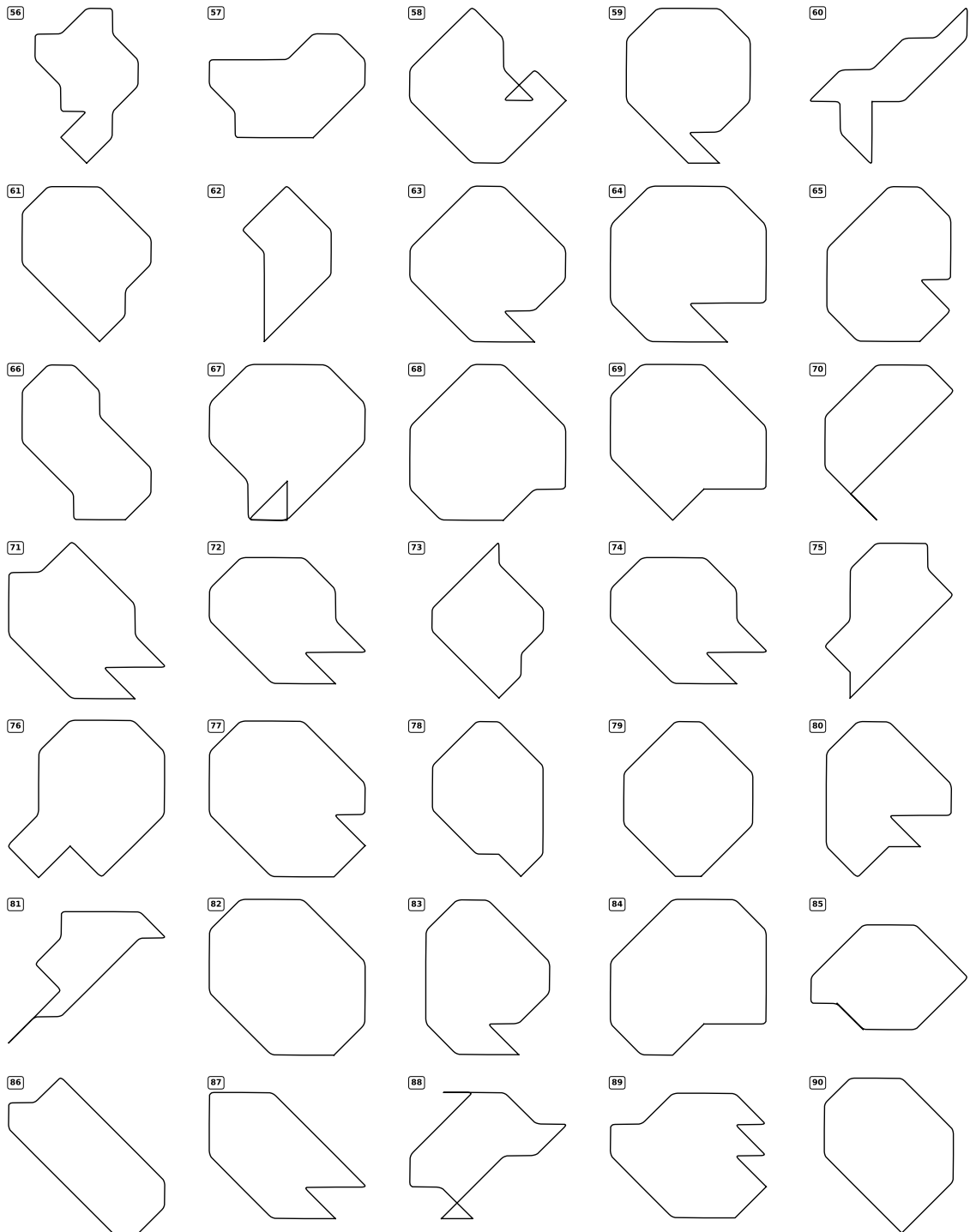


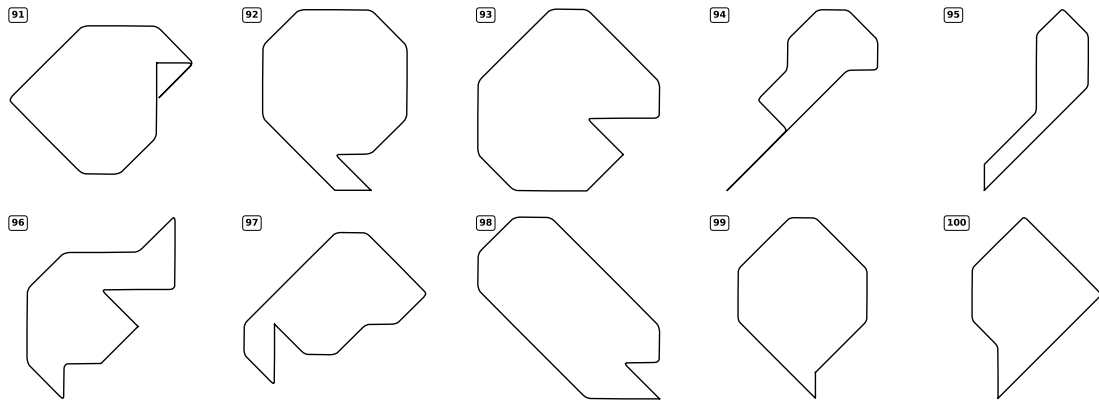
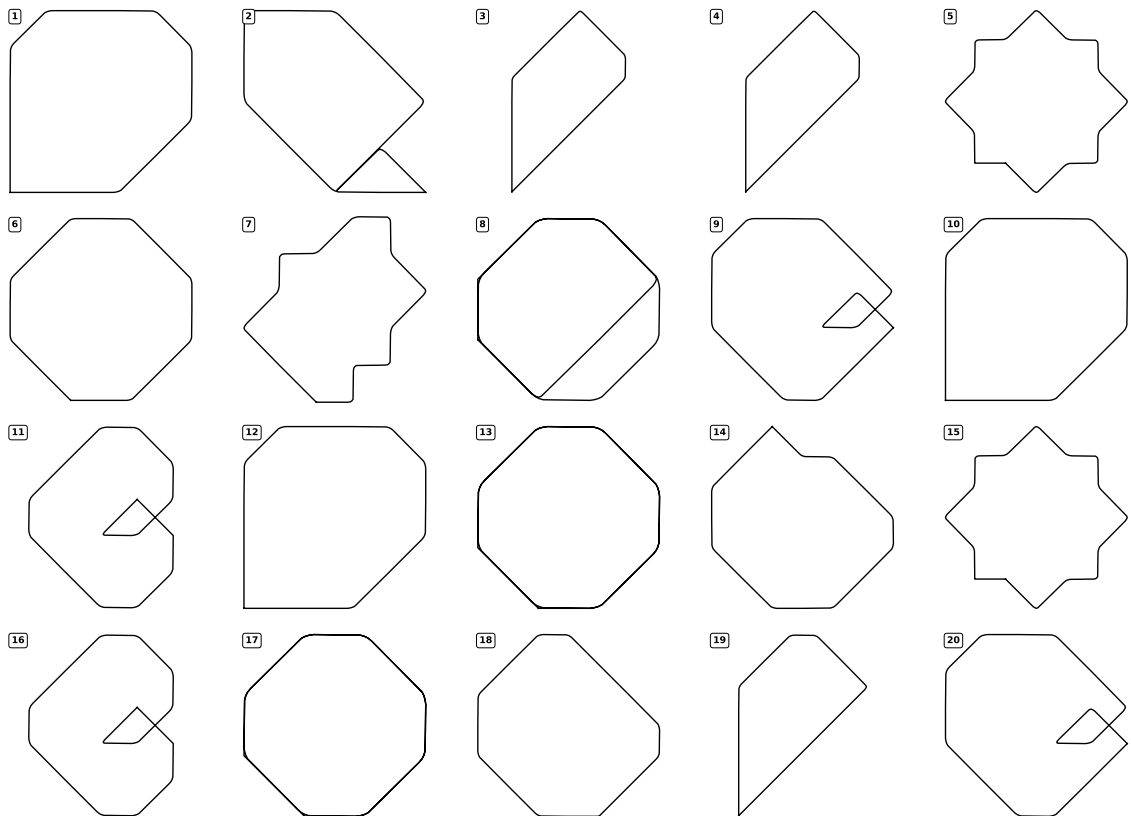


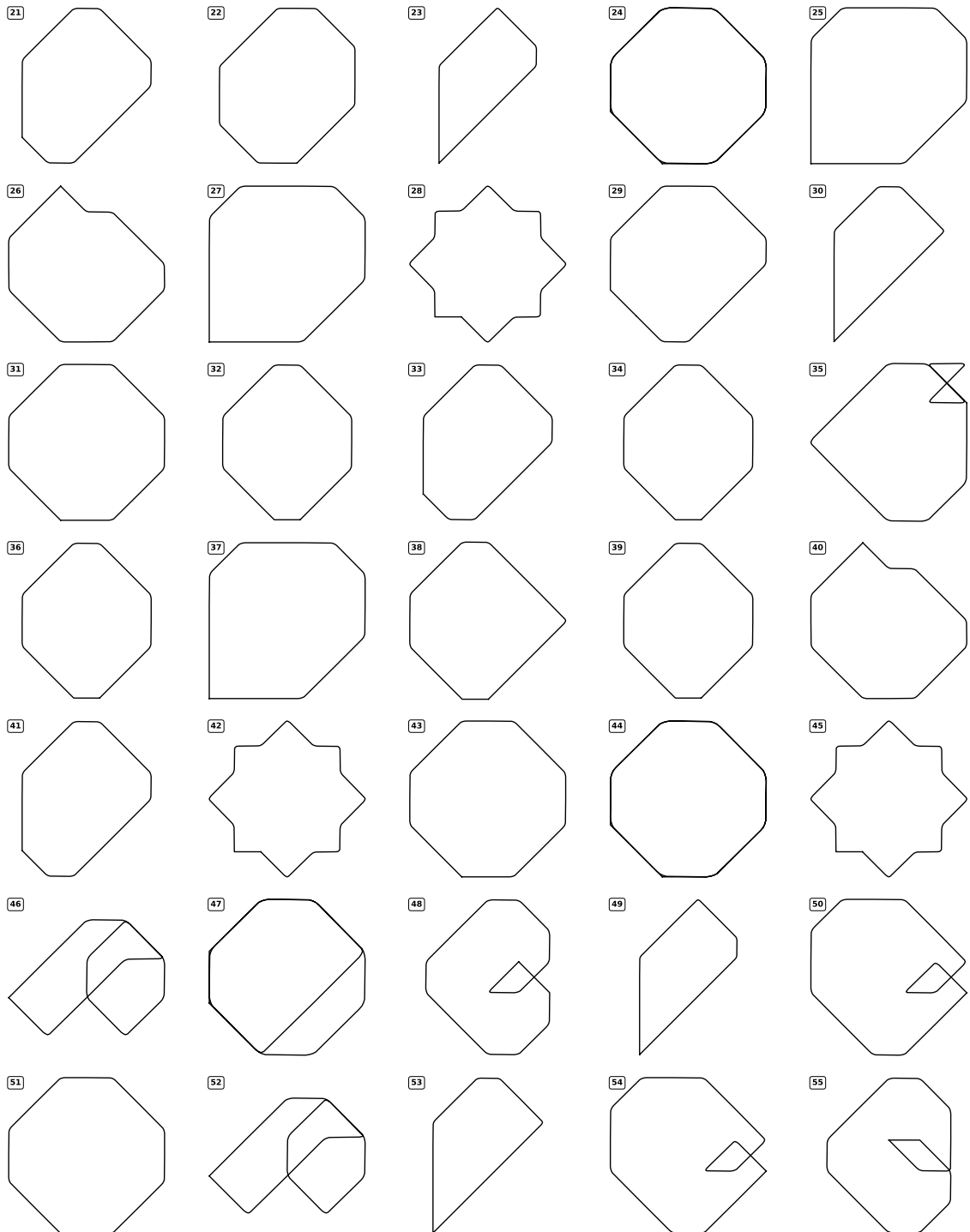
ChainCode-Compleja (100 tracks)

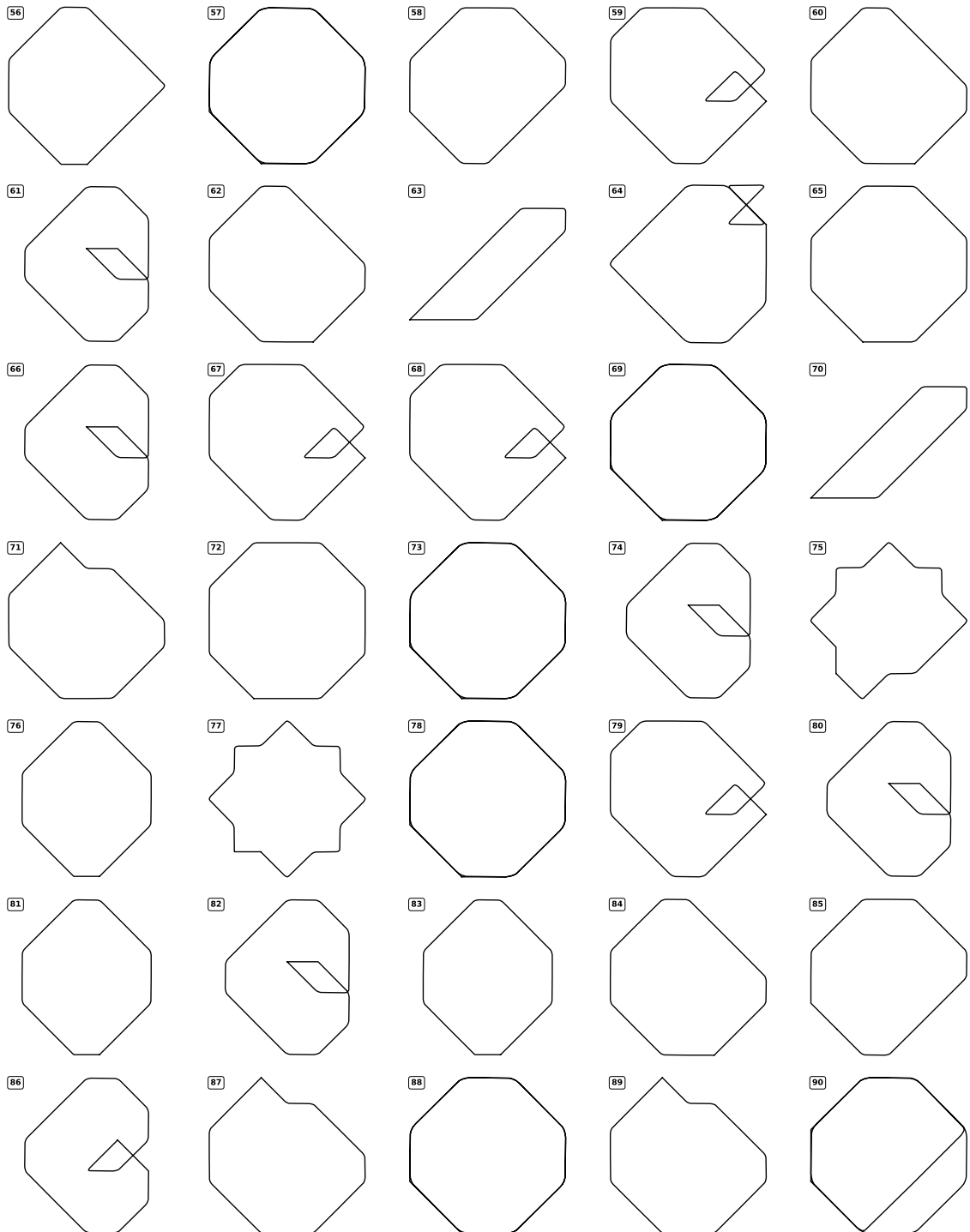


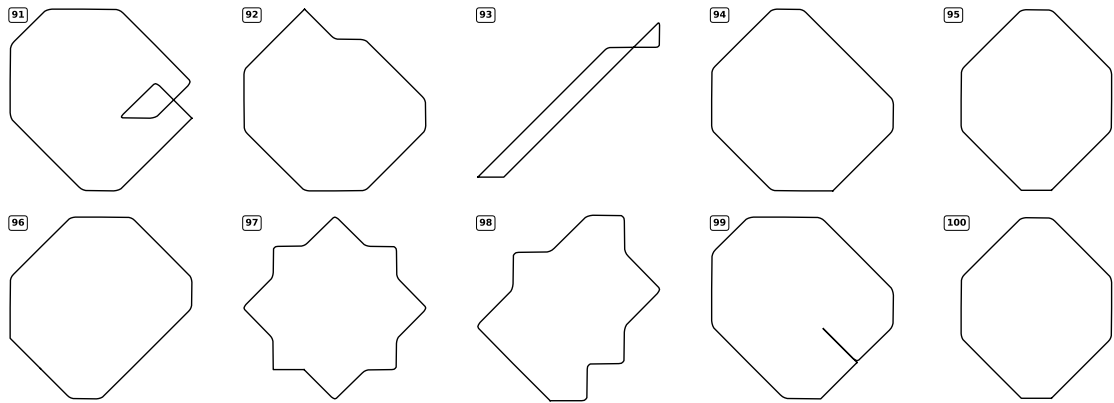
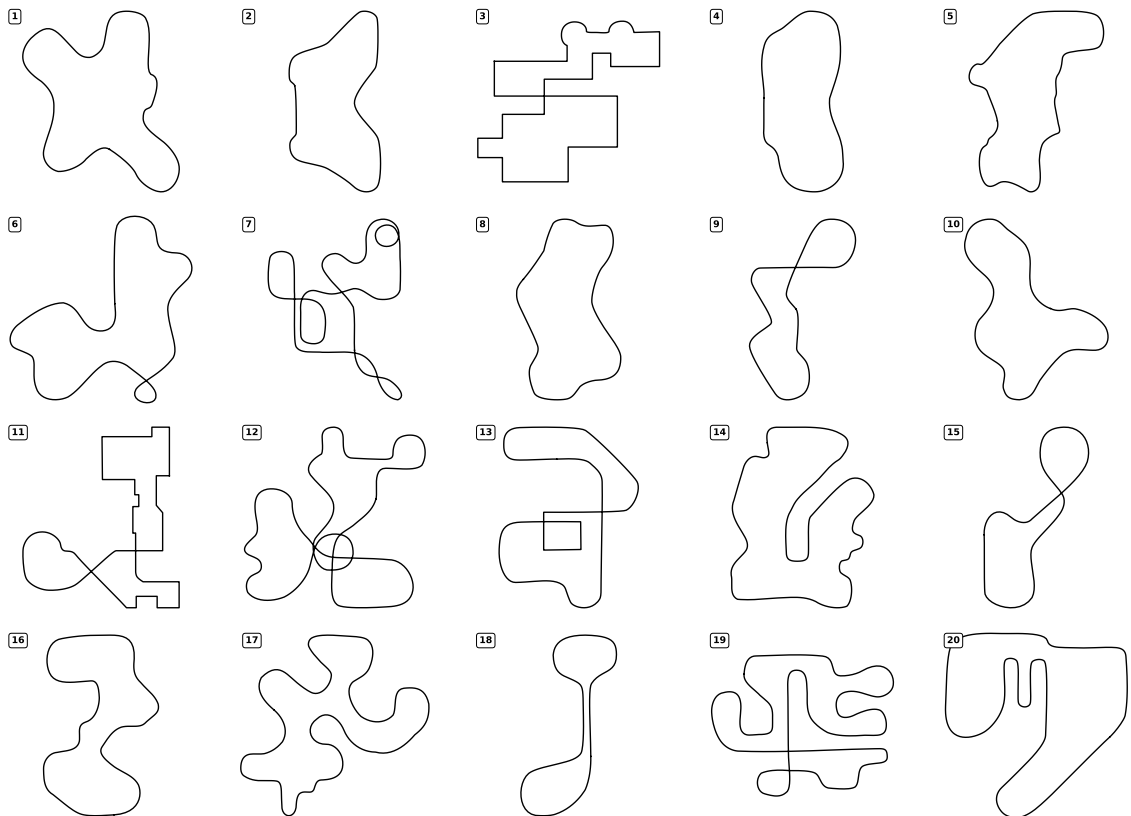


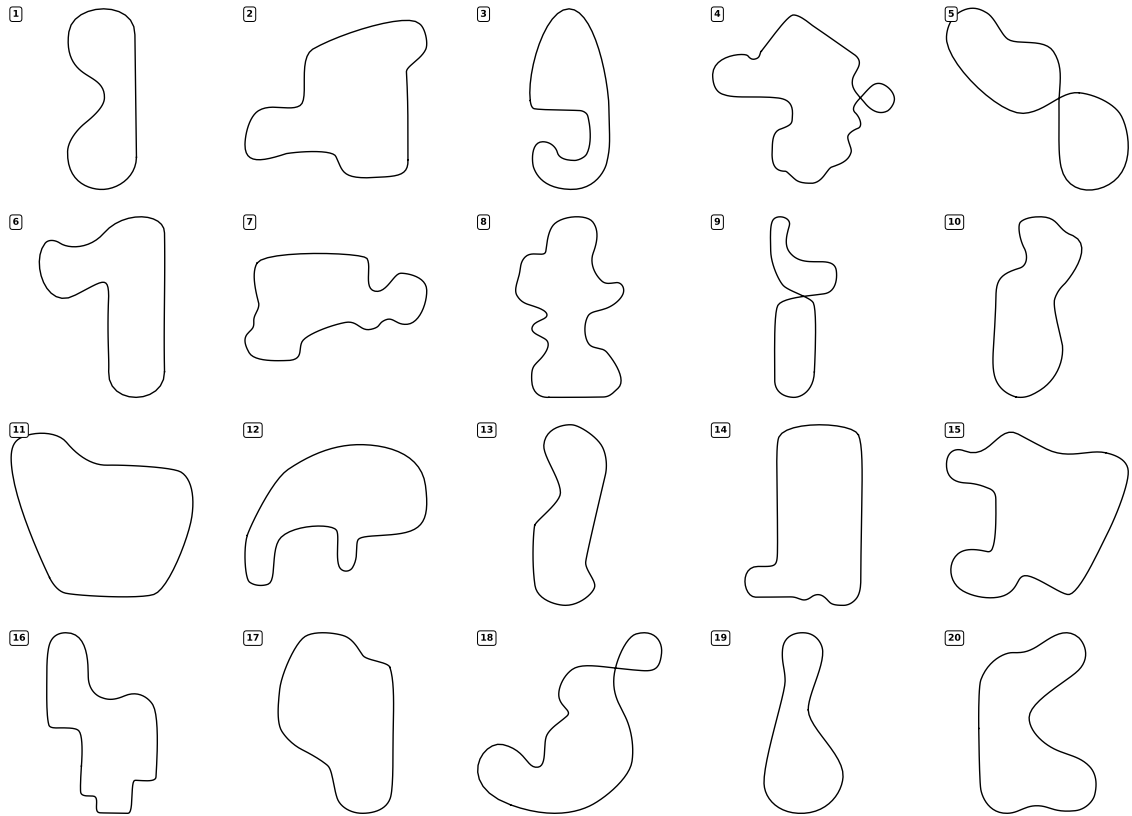
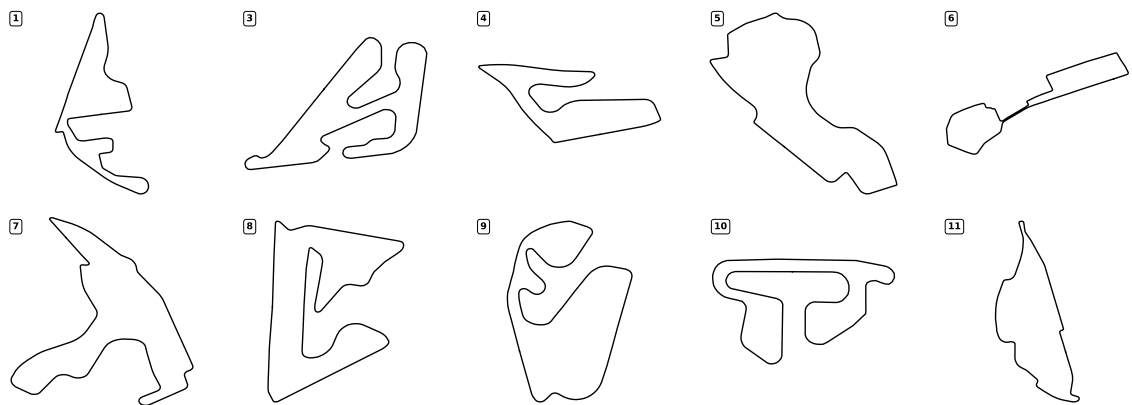


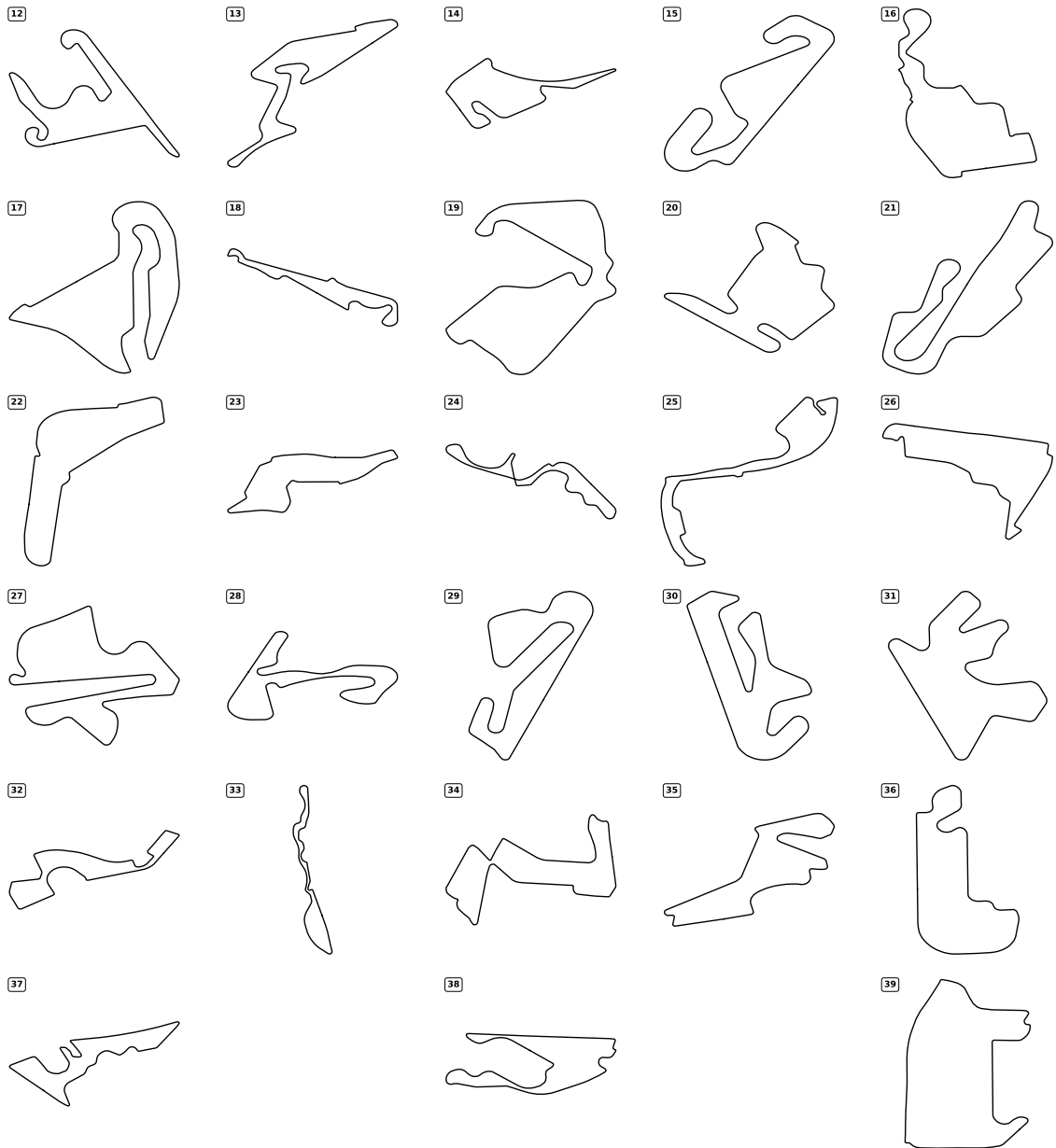
**ChainCode-Original (100 tracks)**

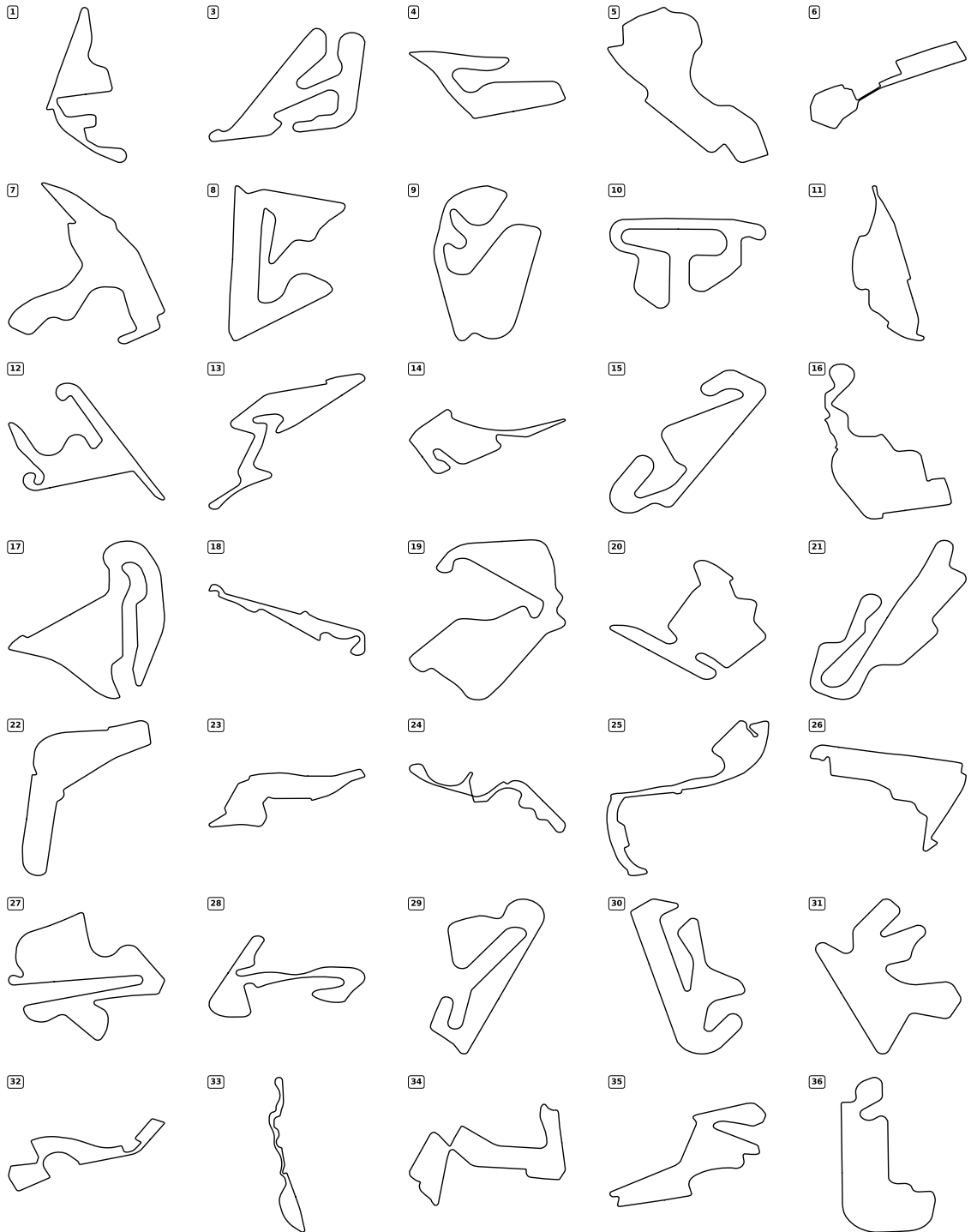




**Crash Team Racing Nitro Fueled (20 tracks)**

Diddy Kong Raicing (20 tracks)**F1 (38 tracks)**

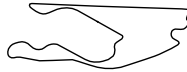


F1-int (38 tracks)

37



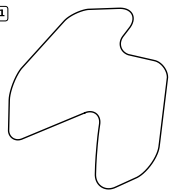
38



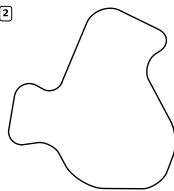
39

**IngramT1 (100 tracks)**

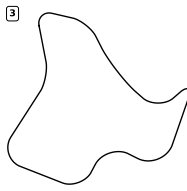
1



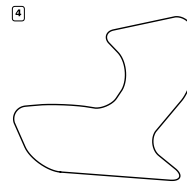
2



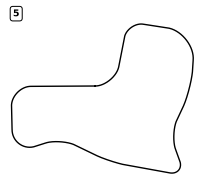
3



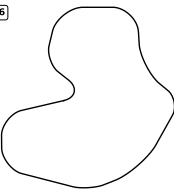
4



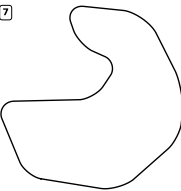
5



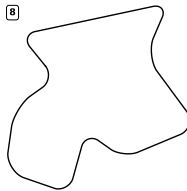
6



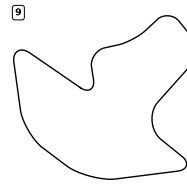
7



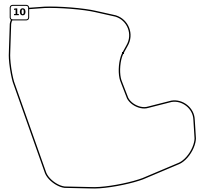
8



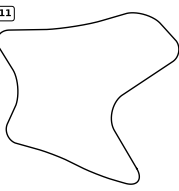
9



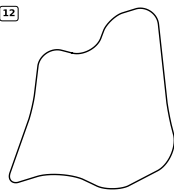
10



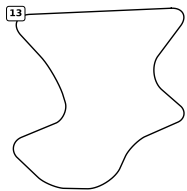
11



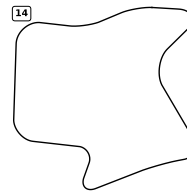
12



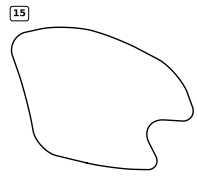
13



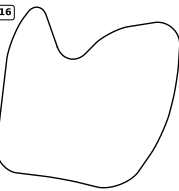
14



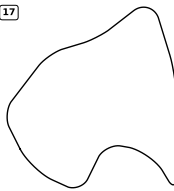
15



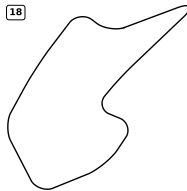
16



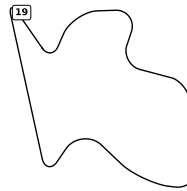
17



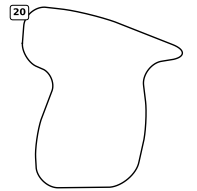
18



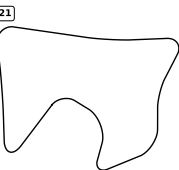
19



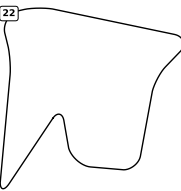
20



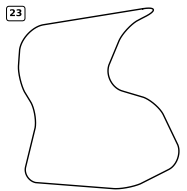
21



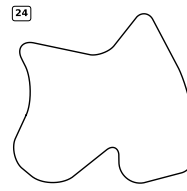
22



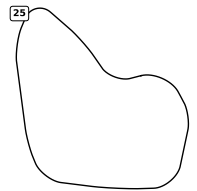
23

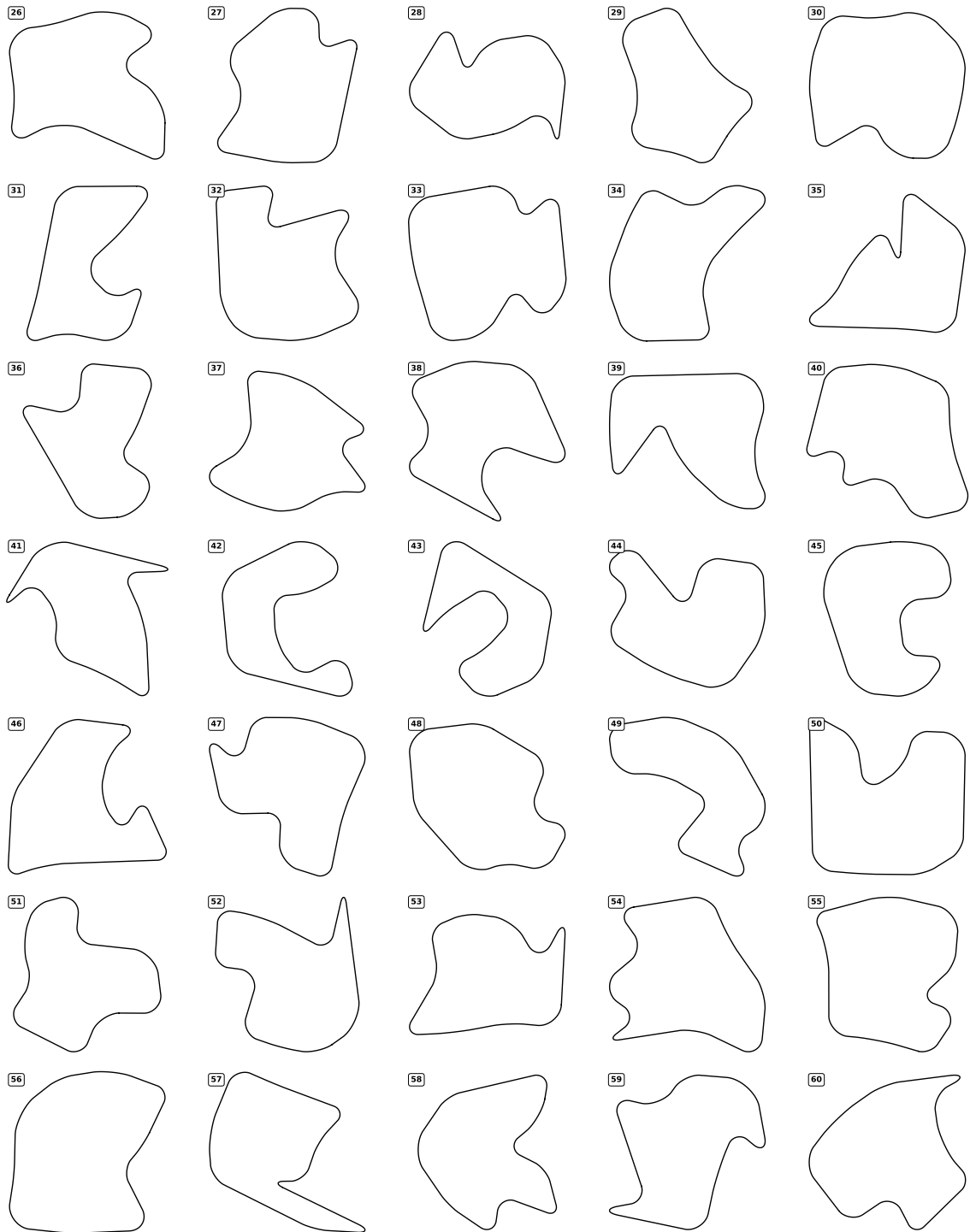


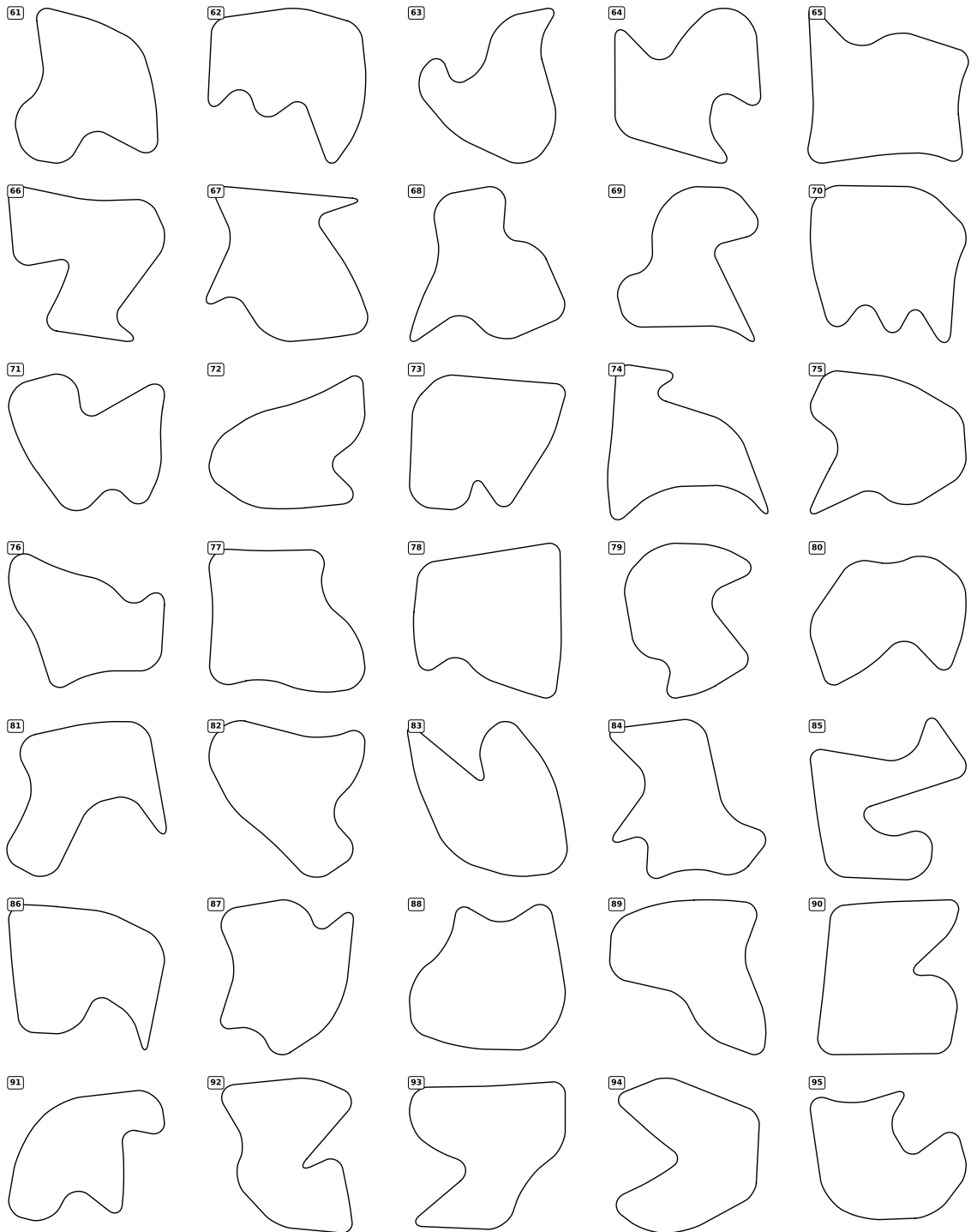
24

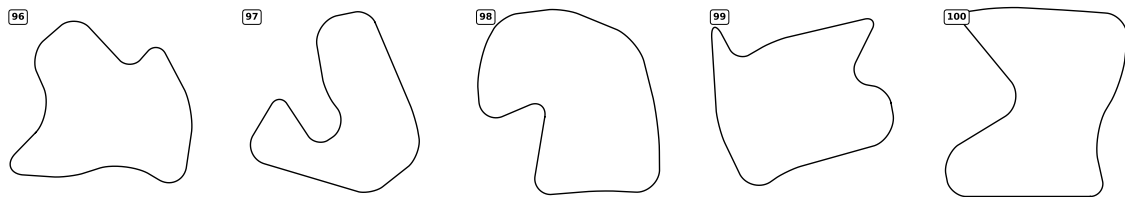
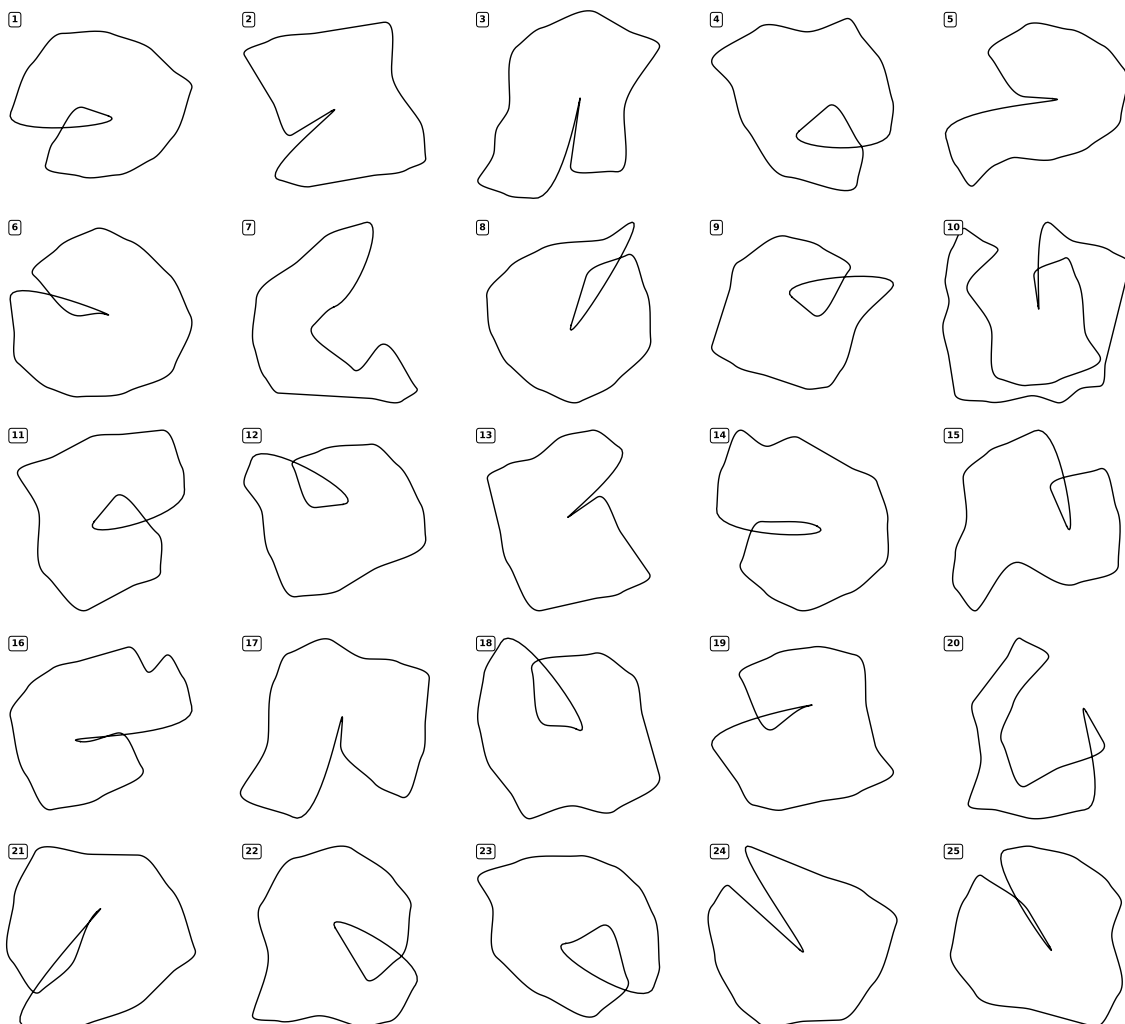


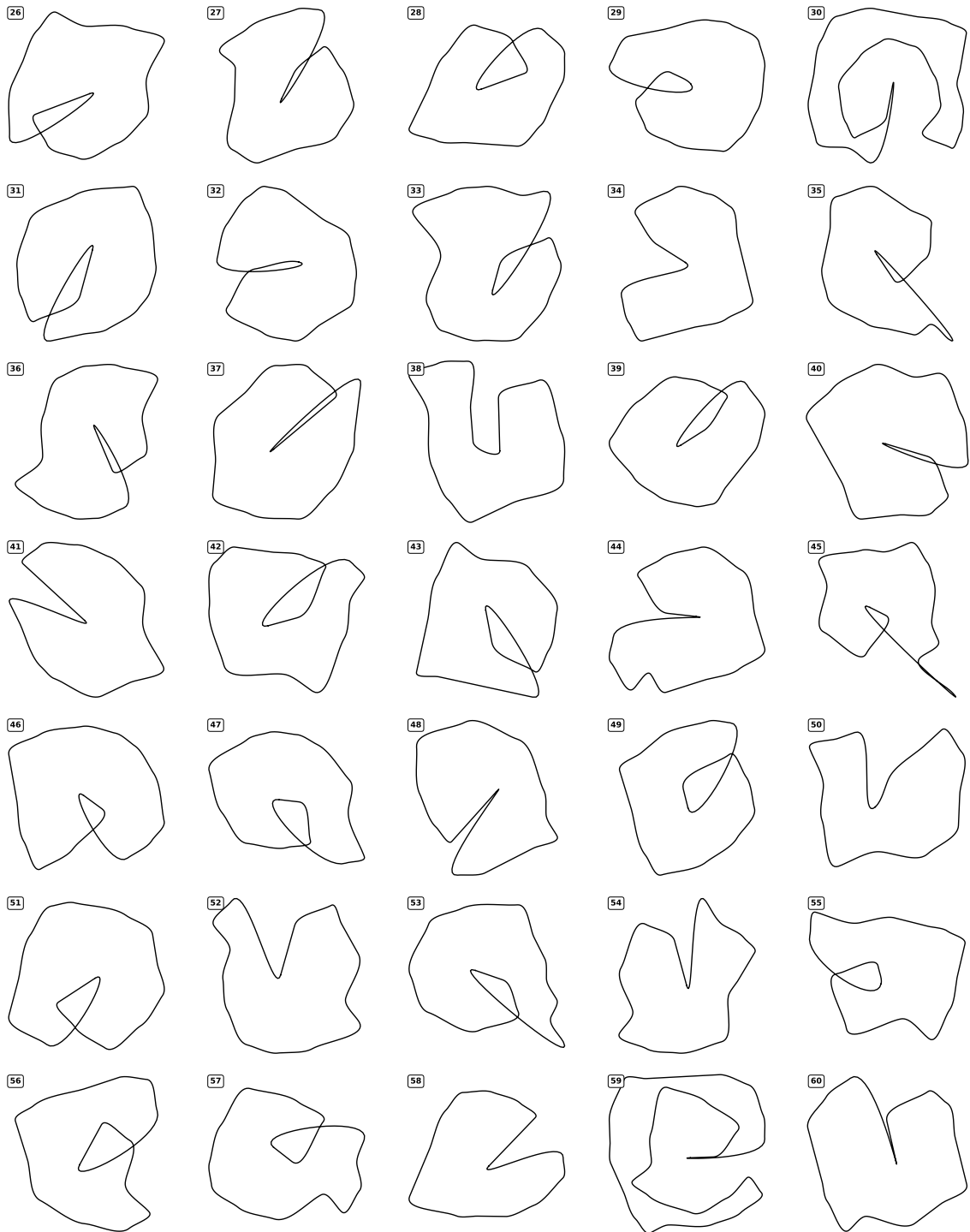
25

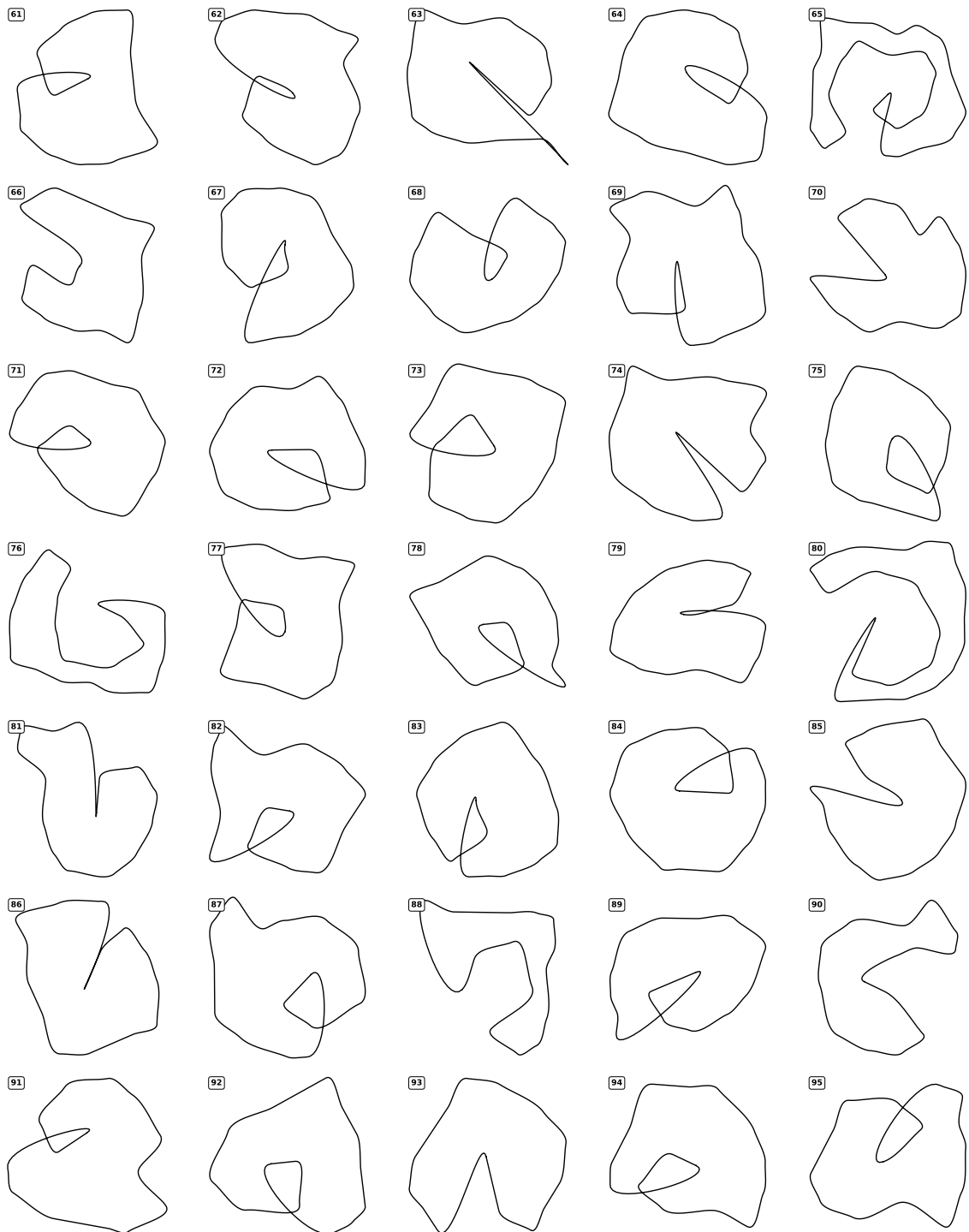


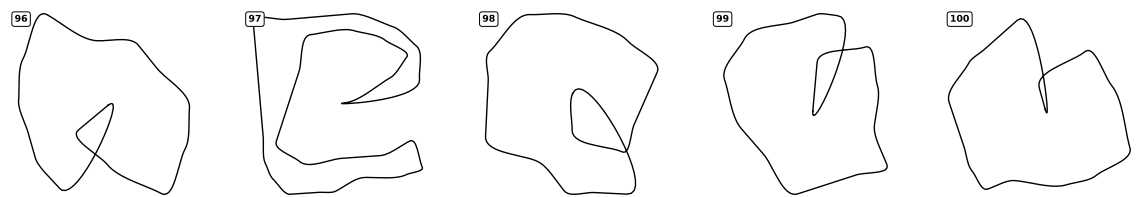




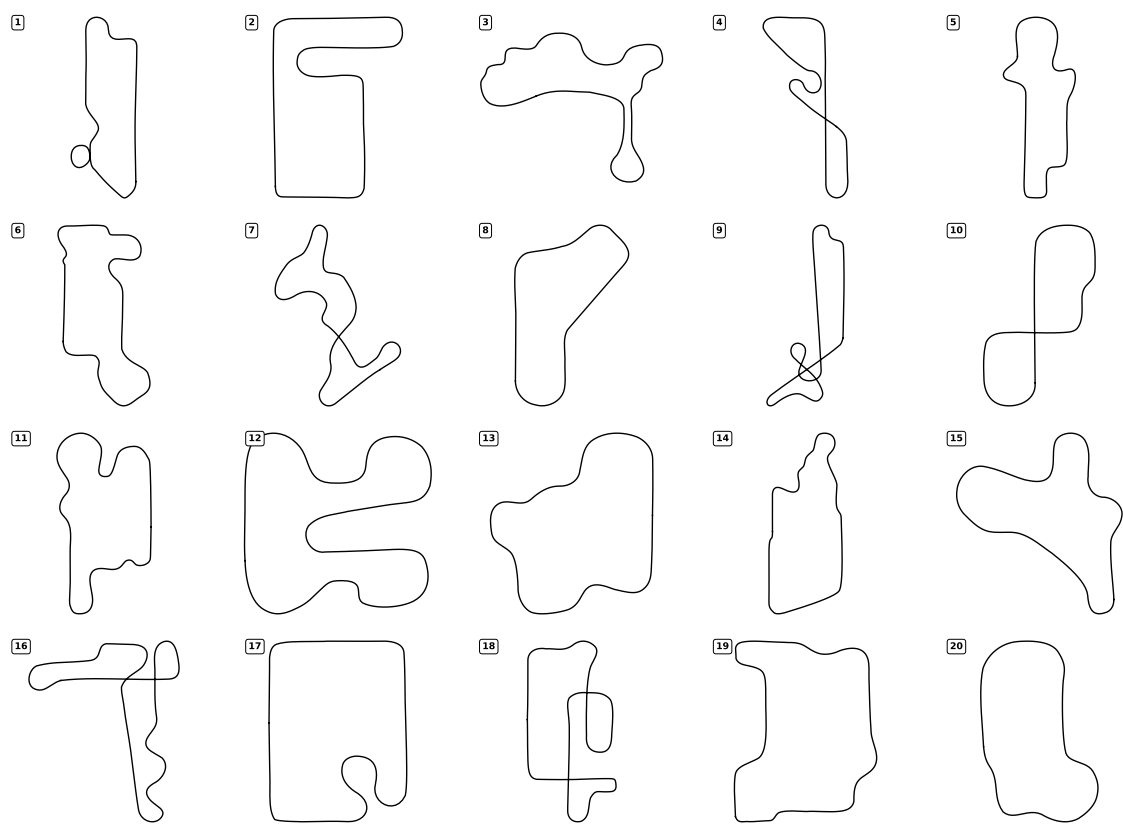
**IngramT2 (100 tracks)**

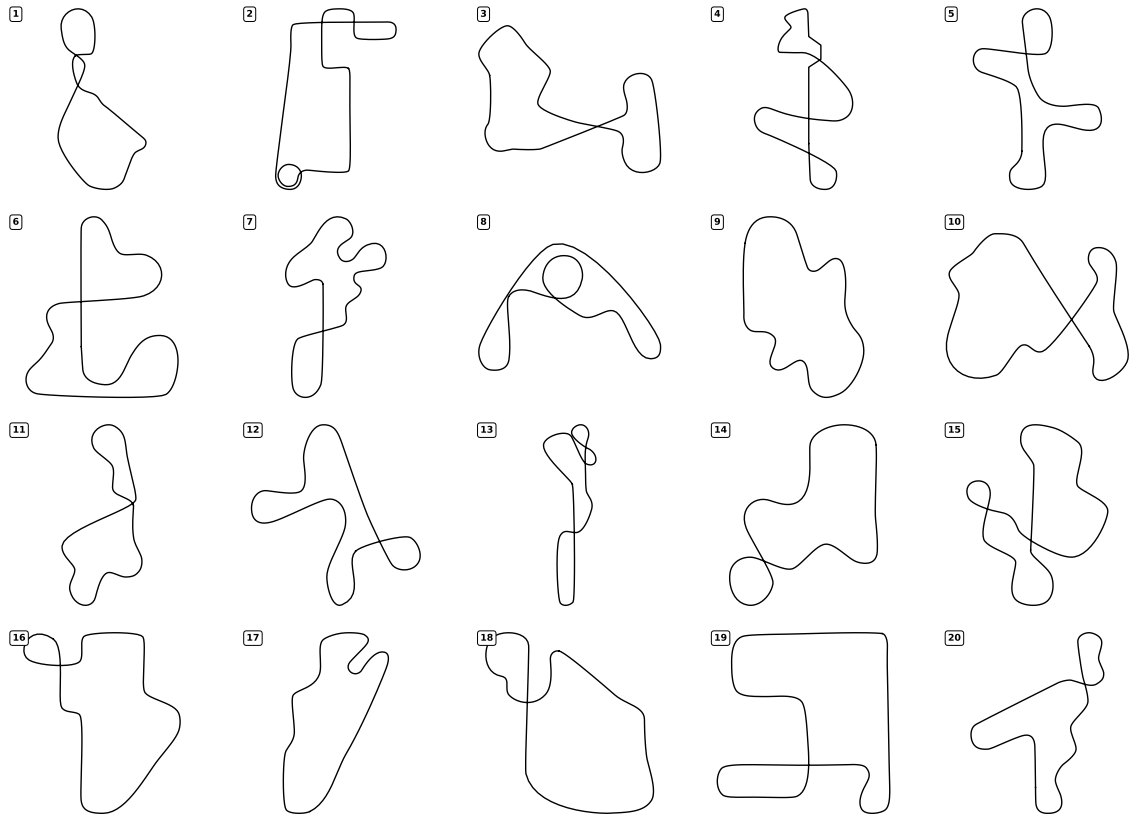
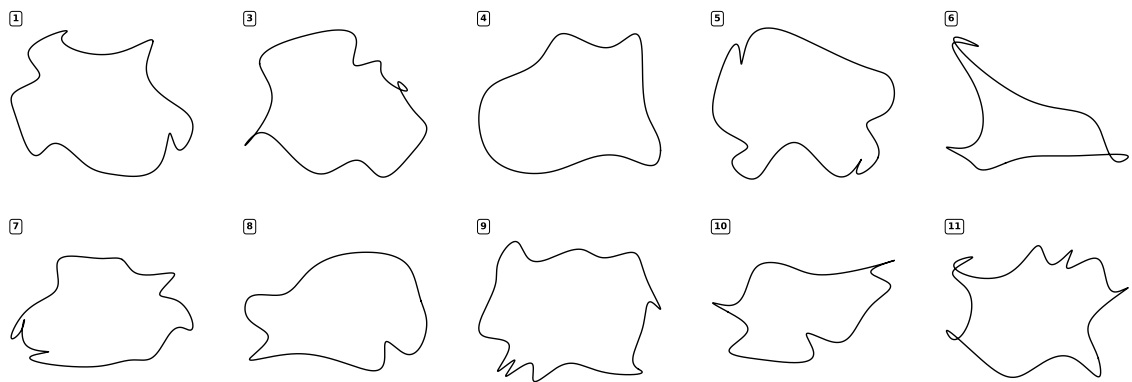


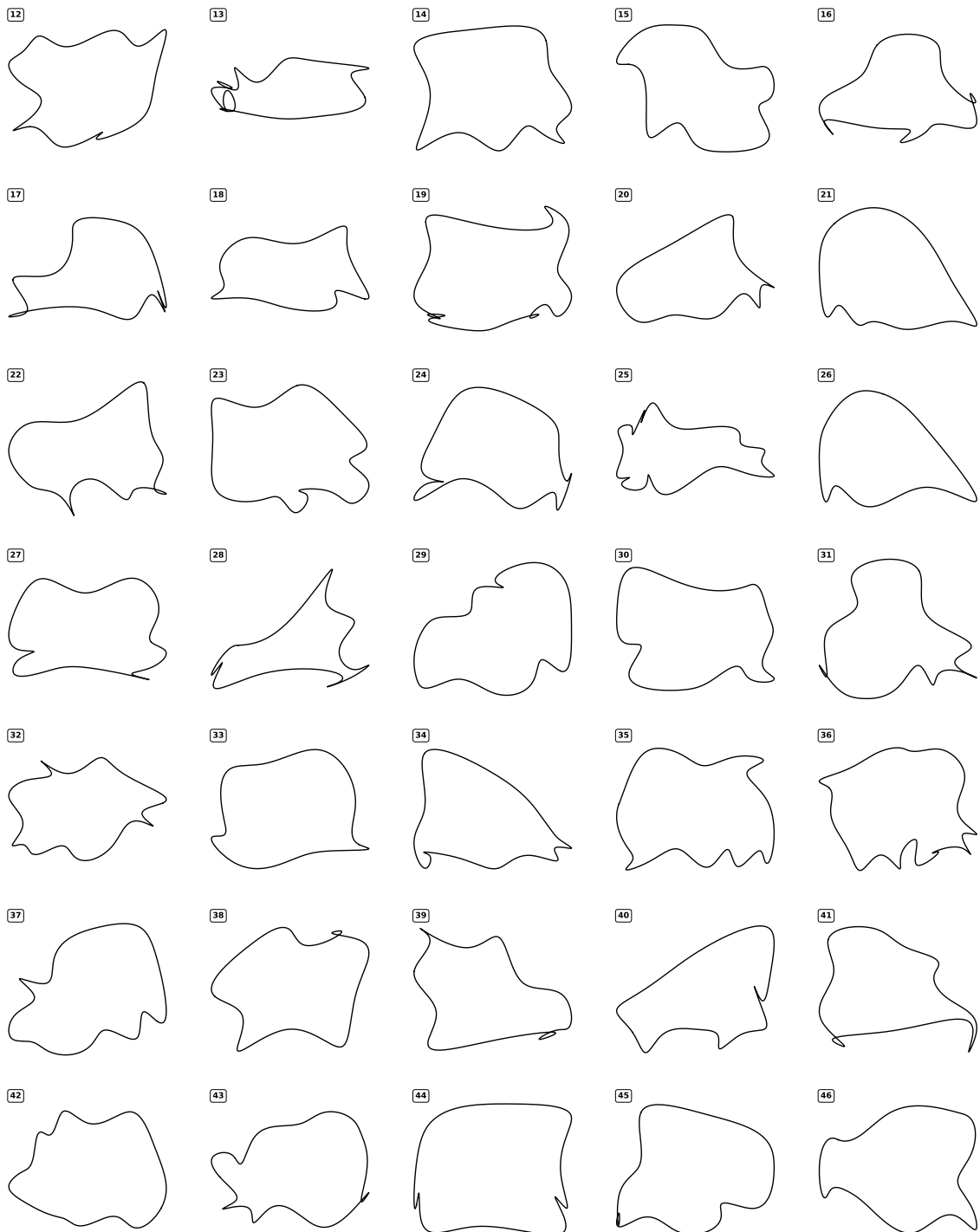


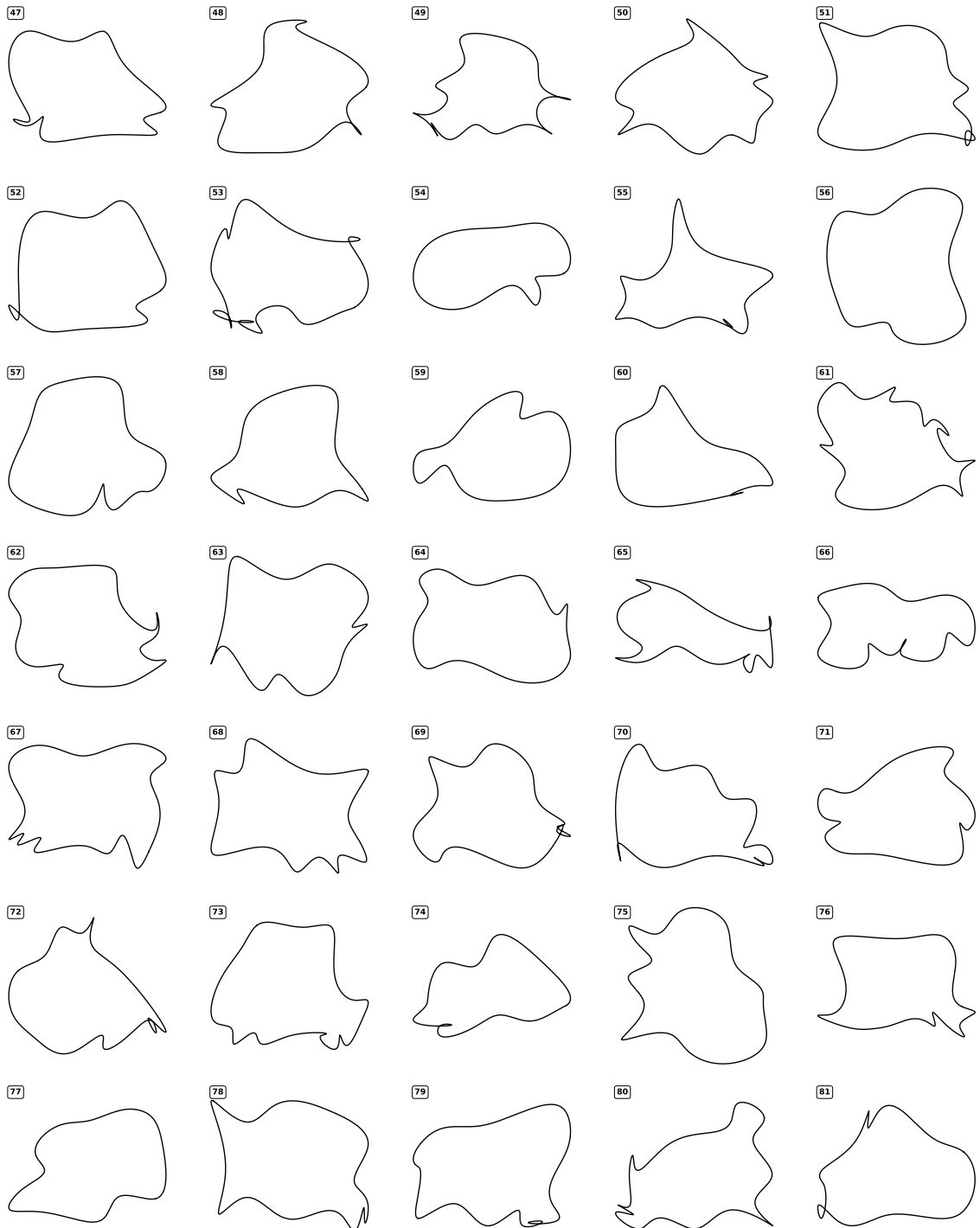


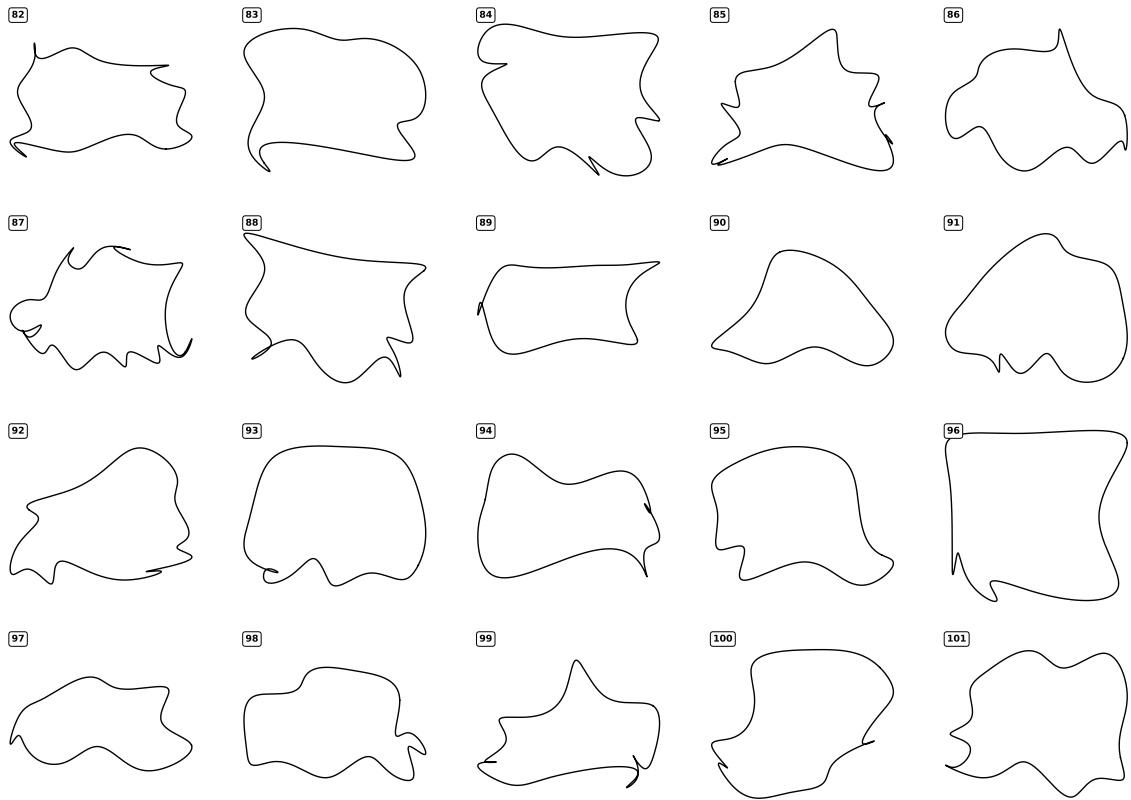
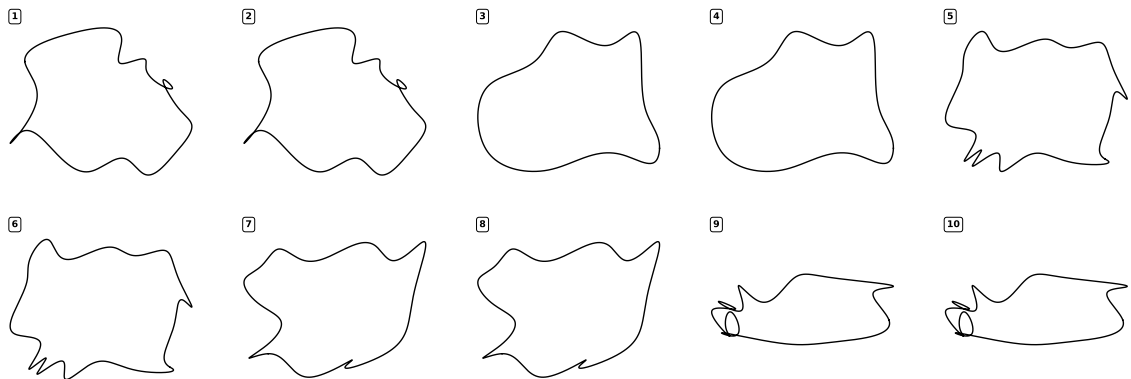
Mario Kart Wii (20 tracks)

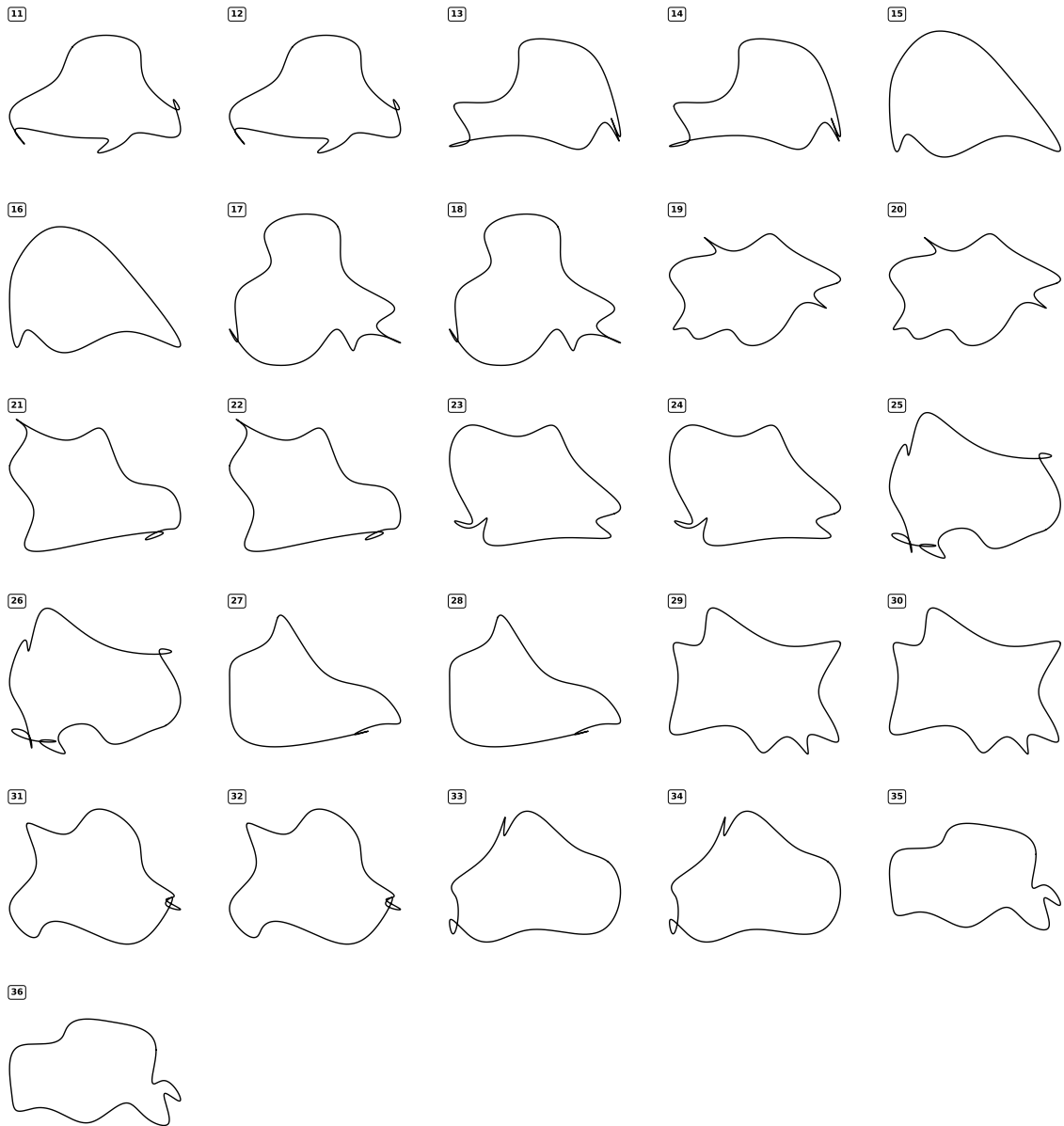


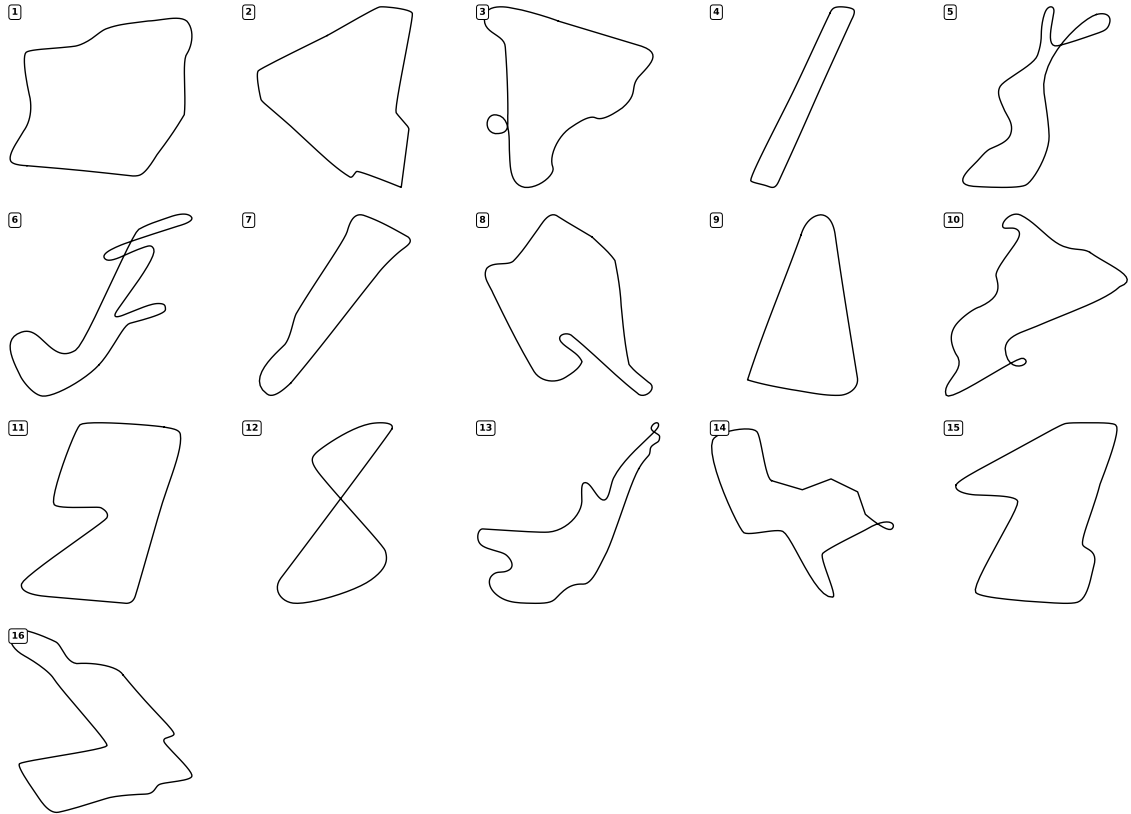
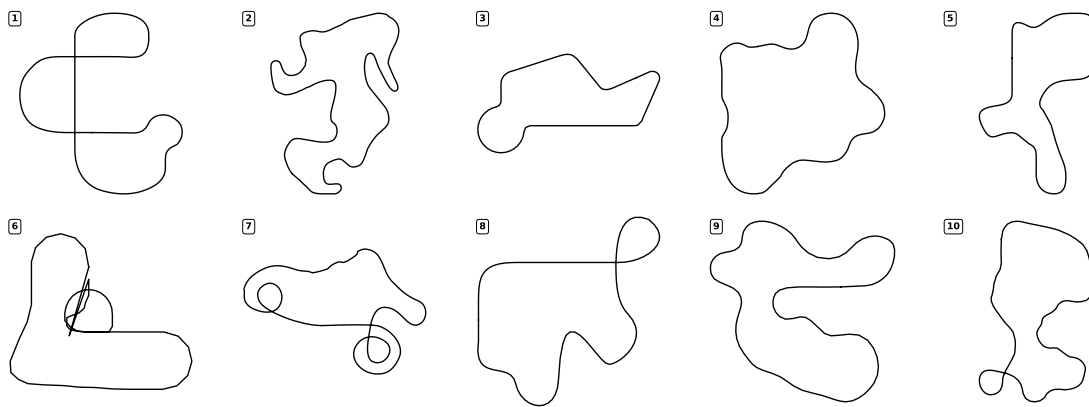
Mario Kart World (20 tracks)**Procedural-X_UniY_Exp (100 tracks)**

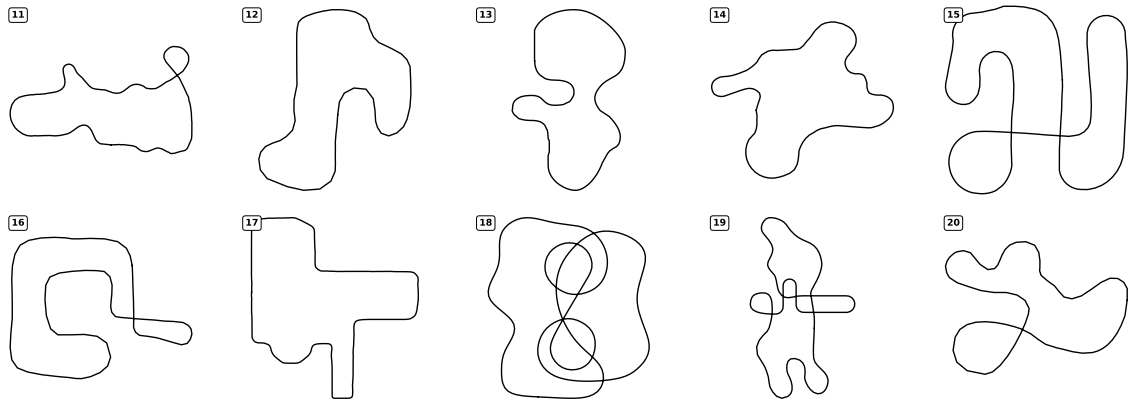
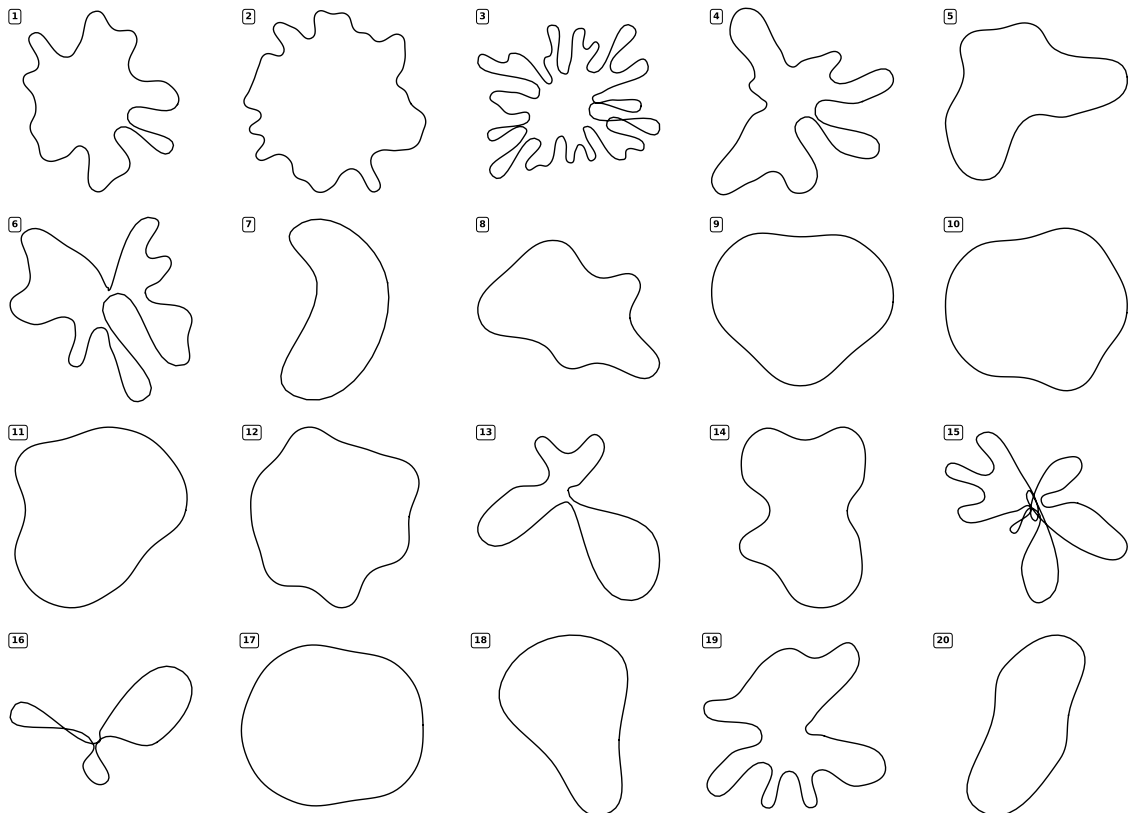




**Procedural-X_UniY_Exp-int (36 tracks)**



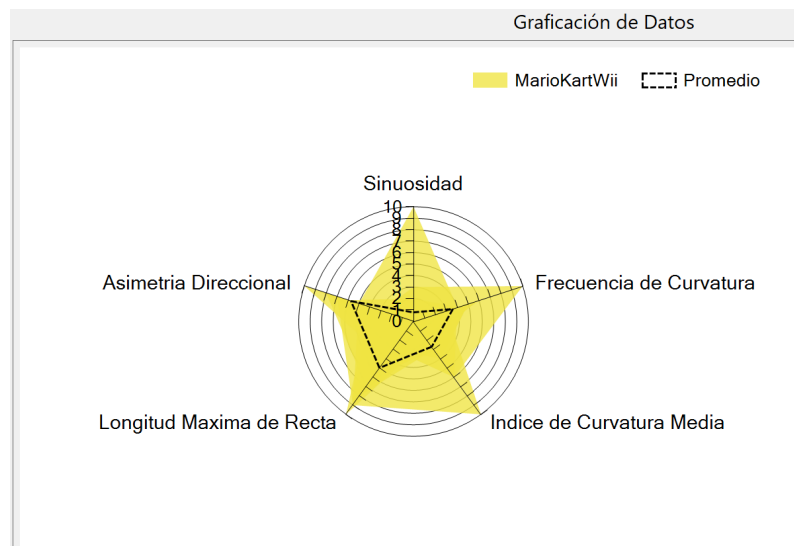
Sonic Riders Zero Gravity (16 tracks)**Super Tux Kart (20 tracks)**

**convex Hull (20 tracks)**

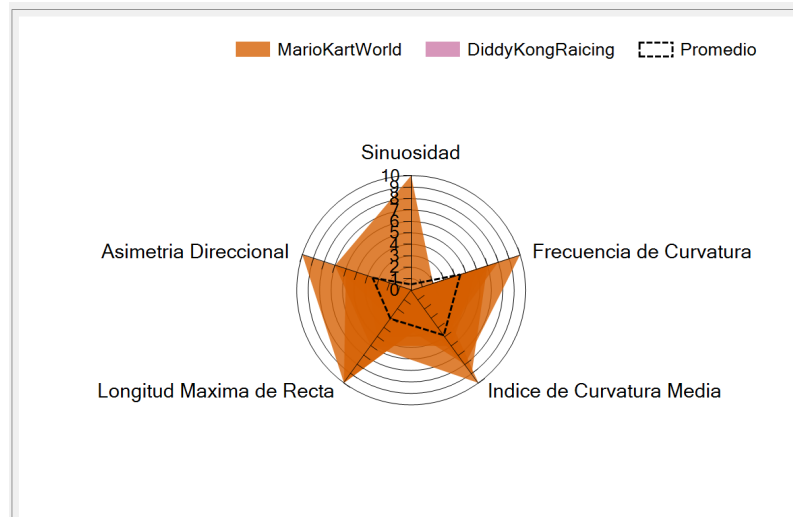
B. Radar charts completo del corpus

B.1. Pistas comerciales

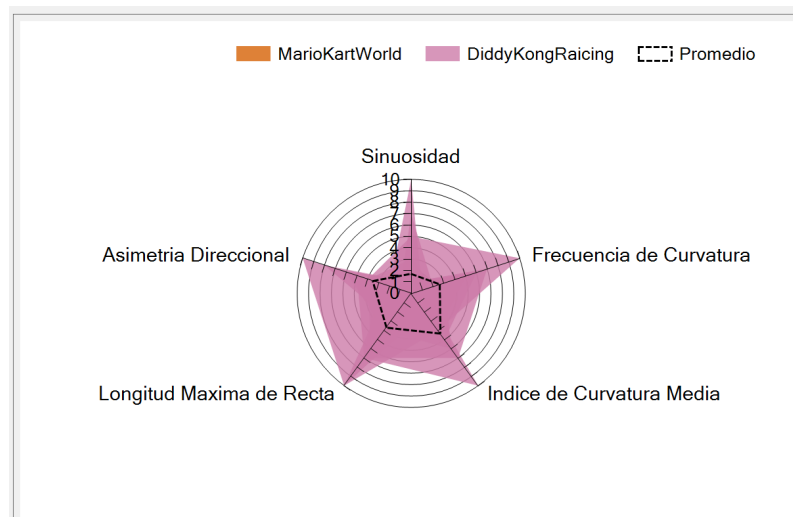
B.1.1. Mario Kart Wii



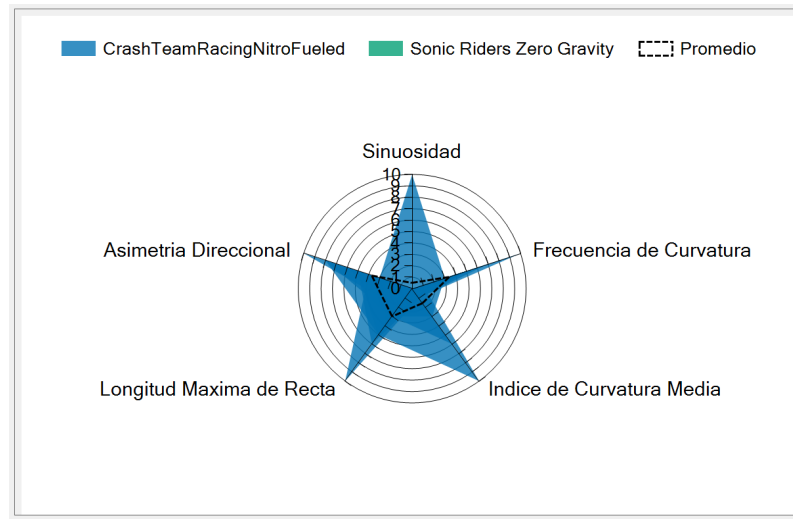
B.1.2. Mario Kart World



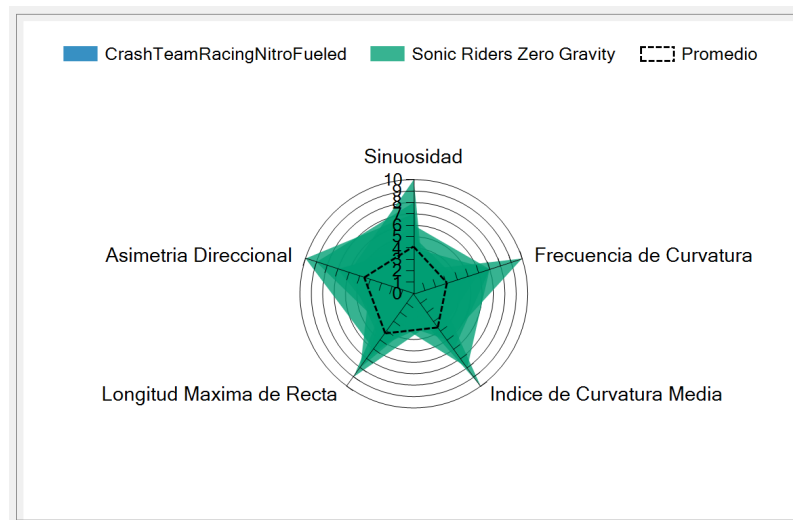
B.1.3. Diddy Kong Raicing



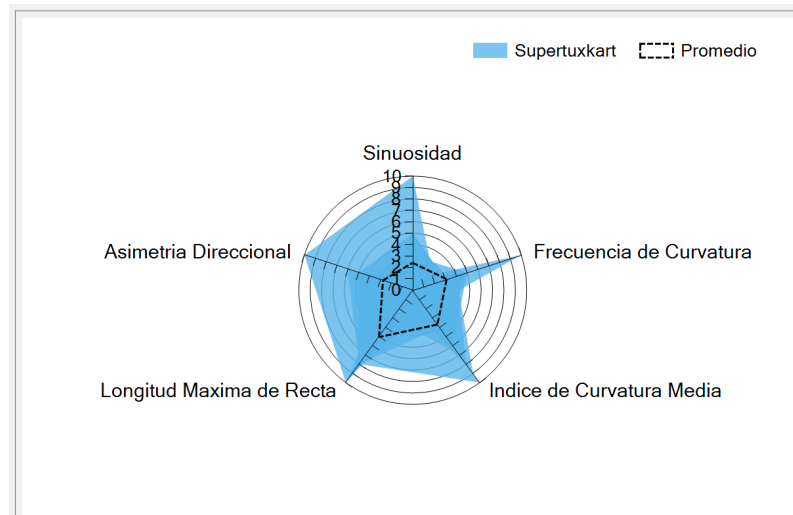
B.1.4. Crash Team Raicing Nitro Fueled



B.1.5. Sonic Raicing Zero Gravity

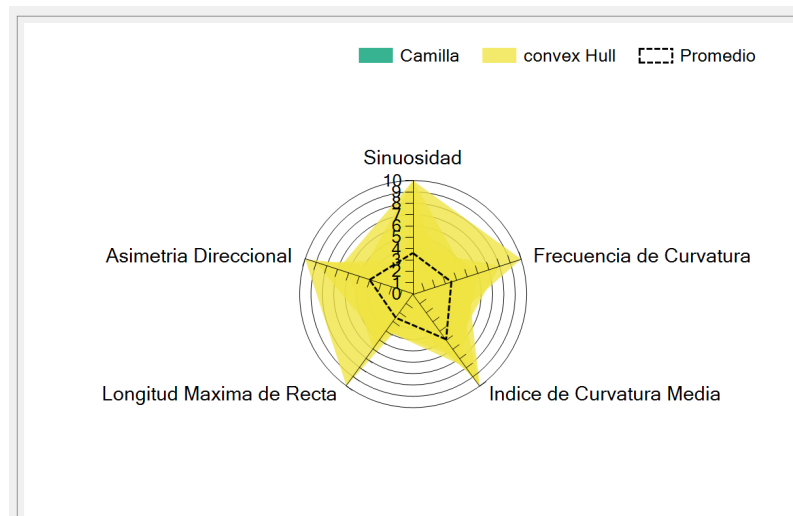


B.1.6. Super Tux Kart

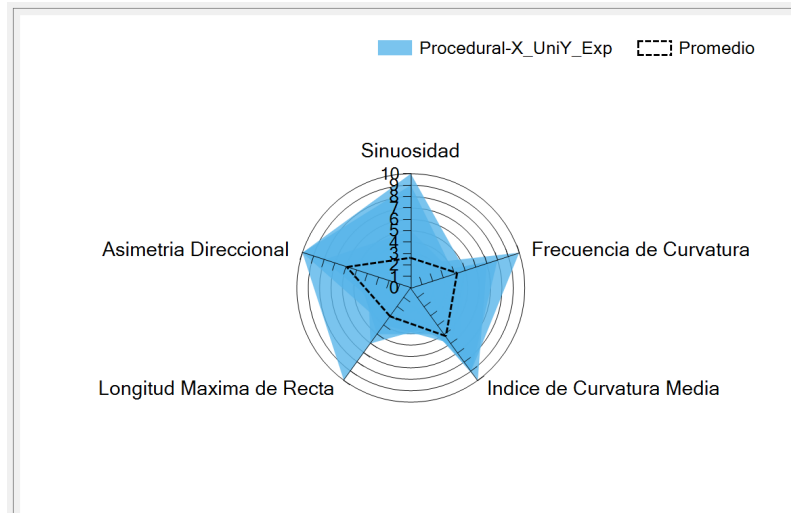


B.2. Pistas Procedurales

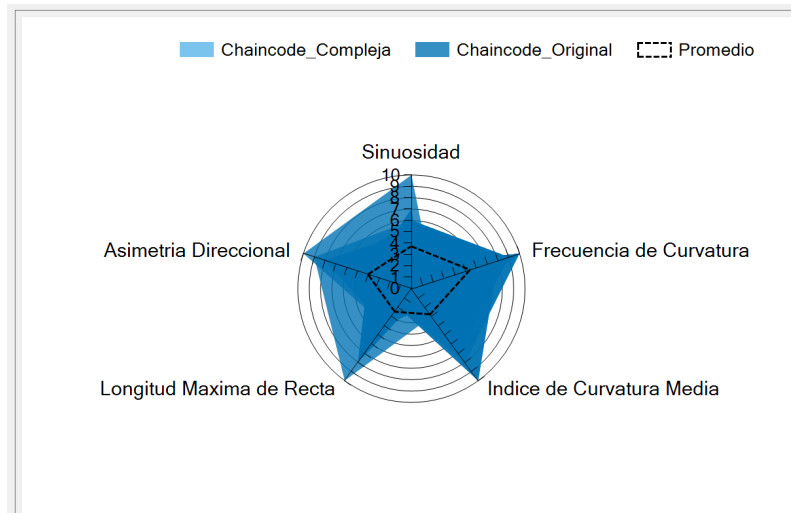
B.2.1. Convex Hull



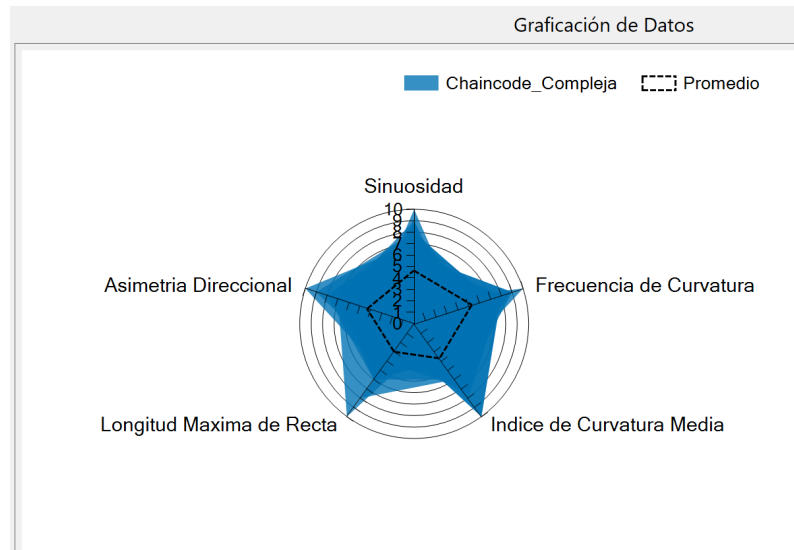
B.2.2. Procedural-X_UniY_Exp



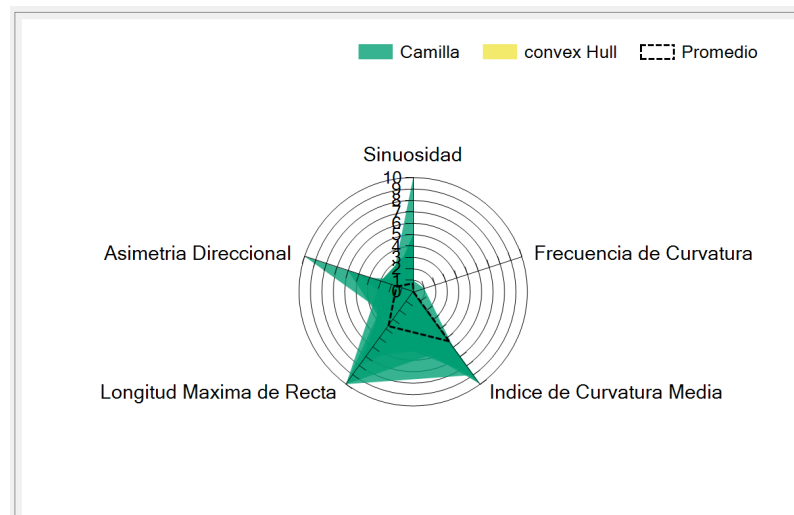
B.2.3. Chaincode_Original

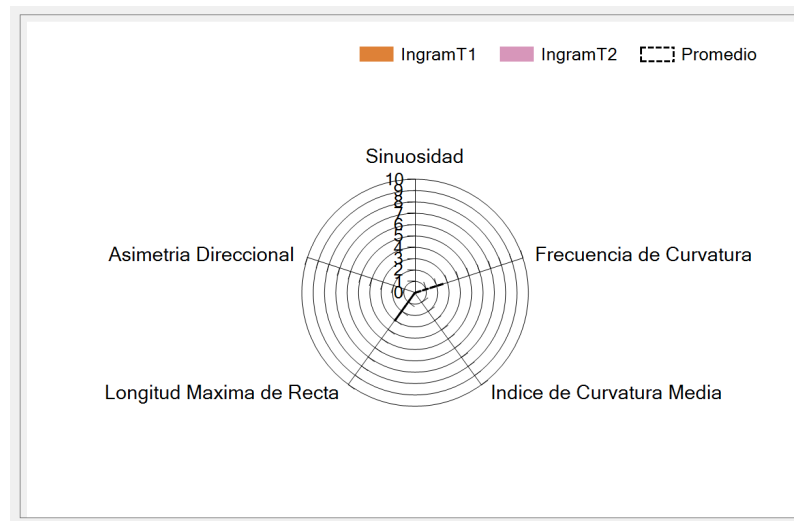
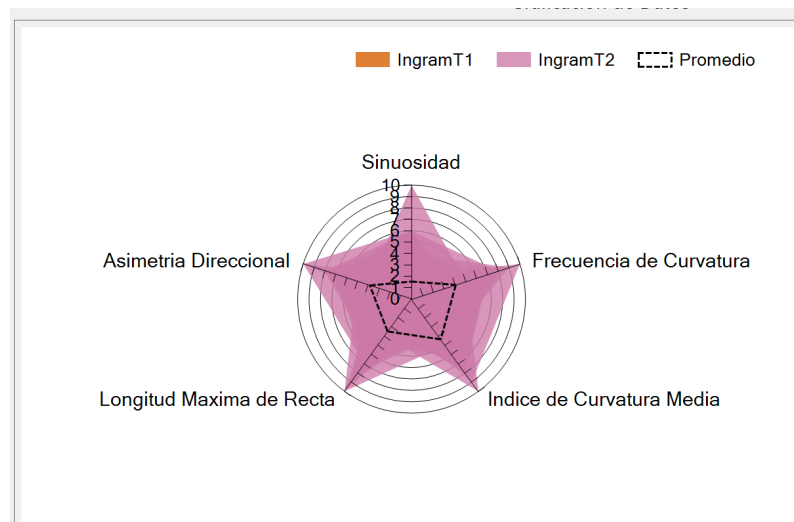


B.2.4. Chaincode_Compleja



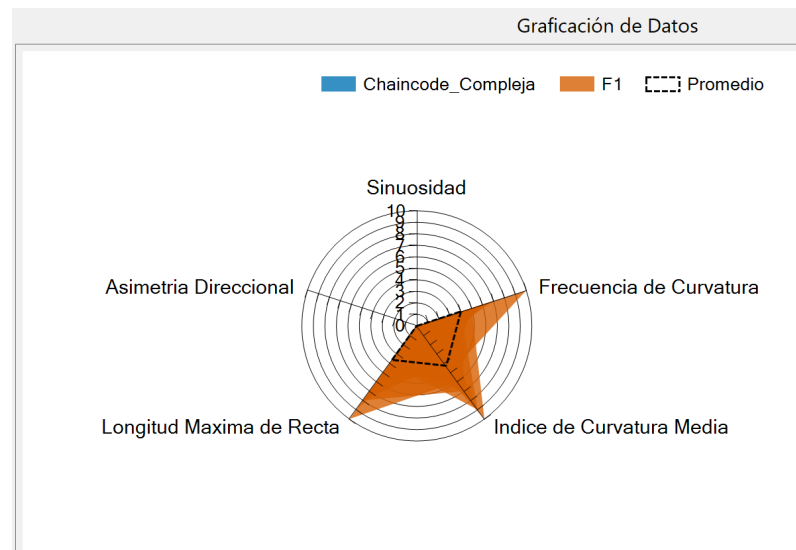
B.2.5. Camilla



B.2.6. IngramT1**B.2.7. IngramT2**

B.3. Pistas Vida Real

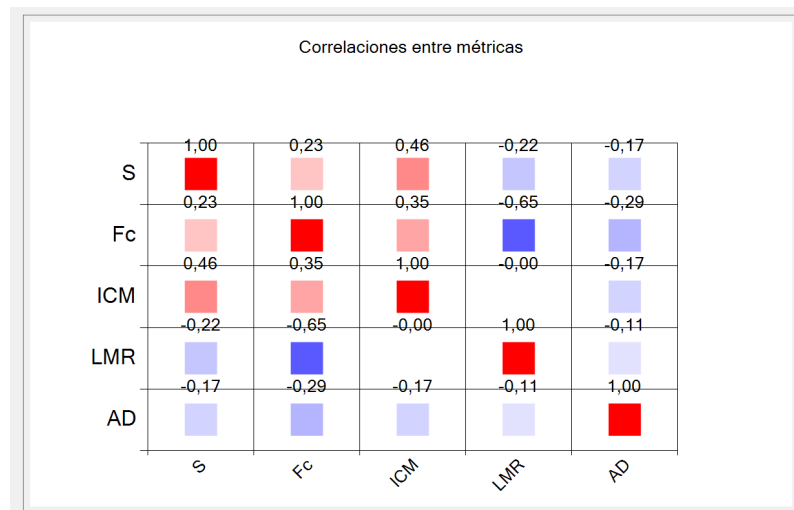
B.3.1. F1



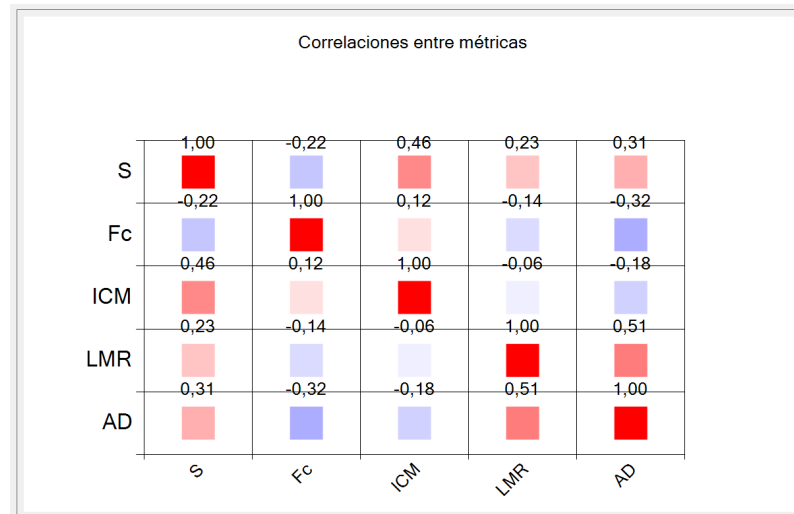
C. Heatmap completo del corpus

C.1. Pistas comerciales

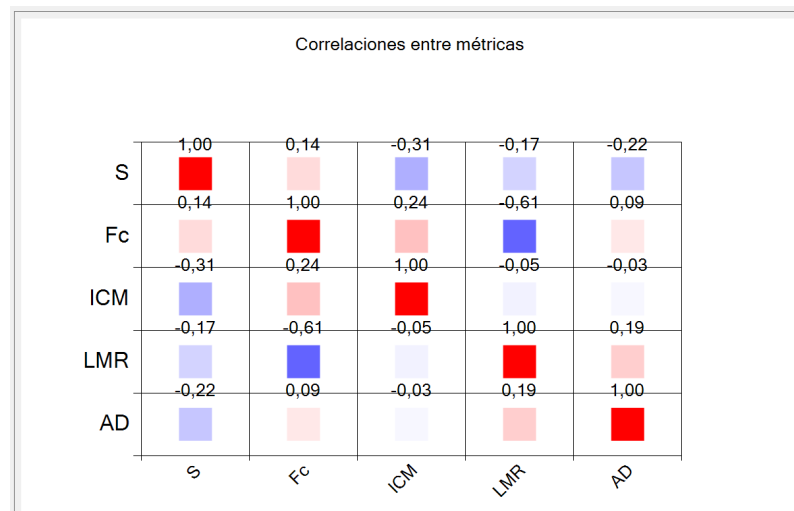
C.1.1. Mario Kart Wii



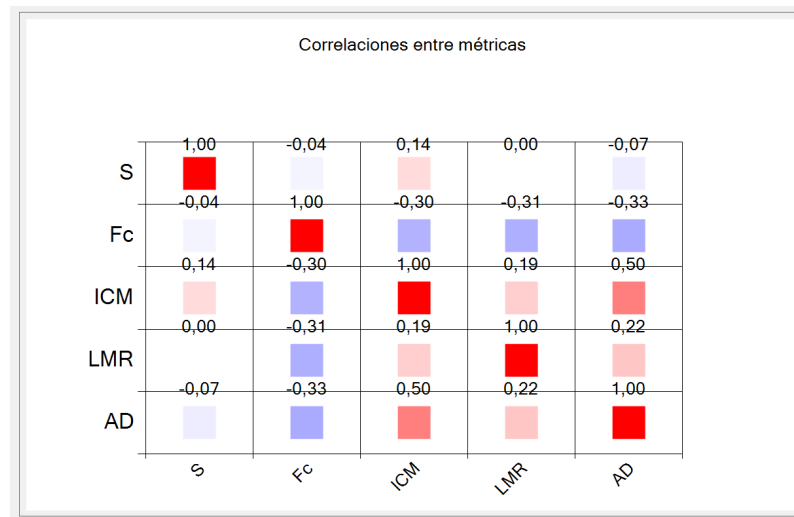
C.1.2. Mario Kart World



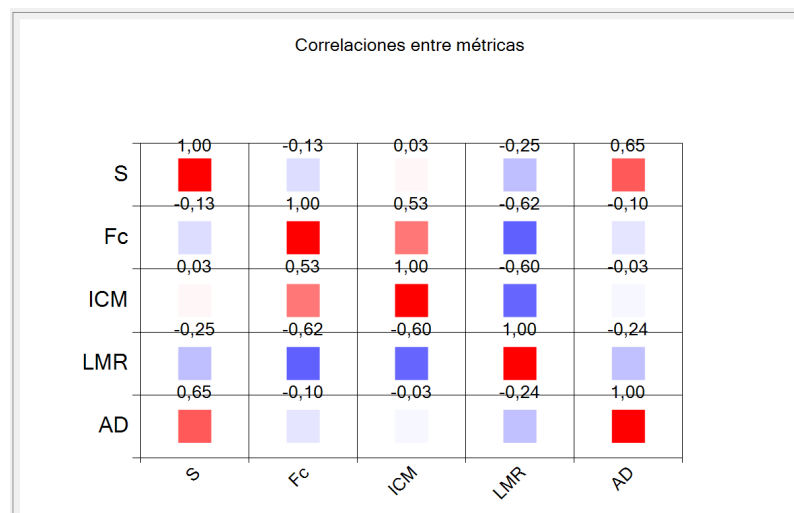
C.1.3. Diddy Kong Raicing



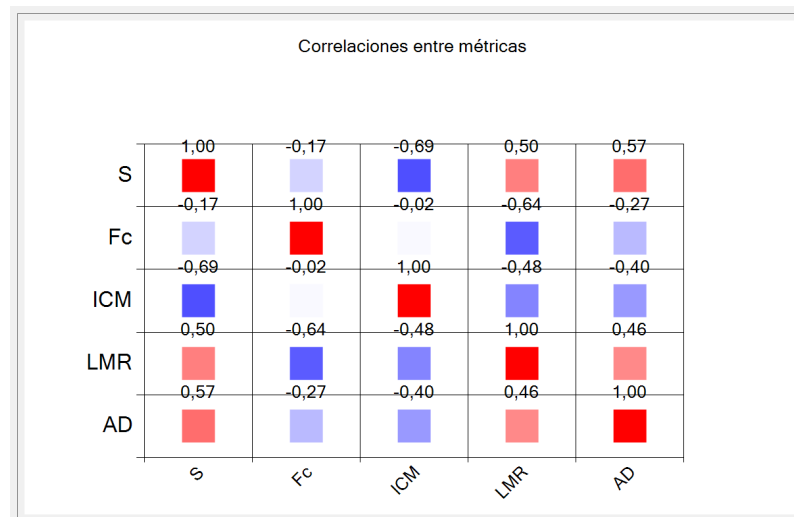
C.1.4. Crash Team Raicing Nitro Fueled



C.1.5. Sonic Raicing Zero Gravity

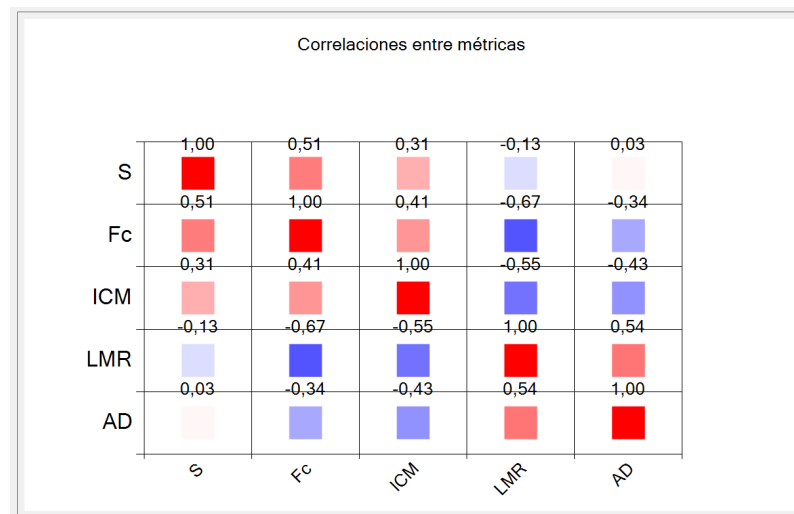


C.1.6. Super Tux Kart

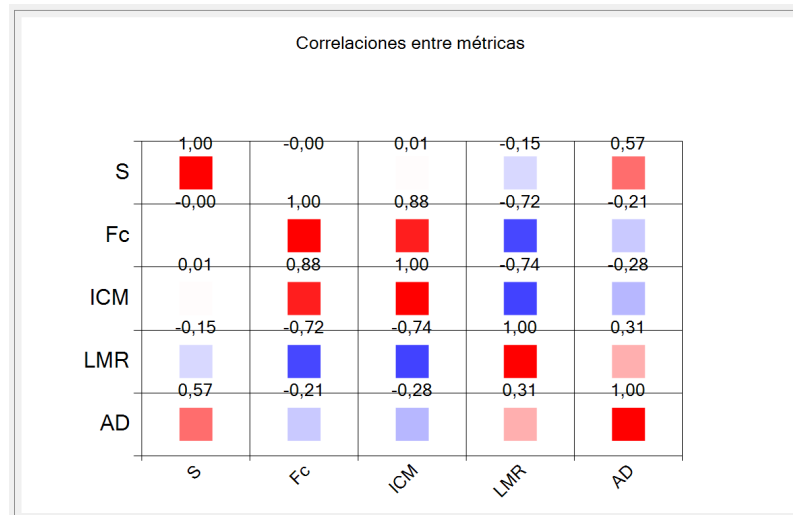


C.2. Pistas Procedurales

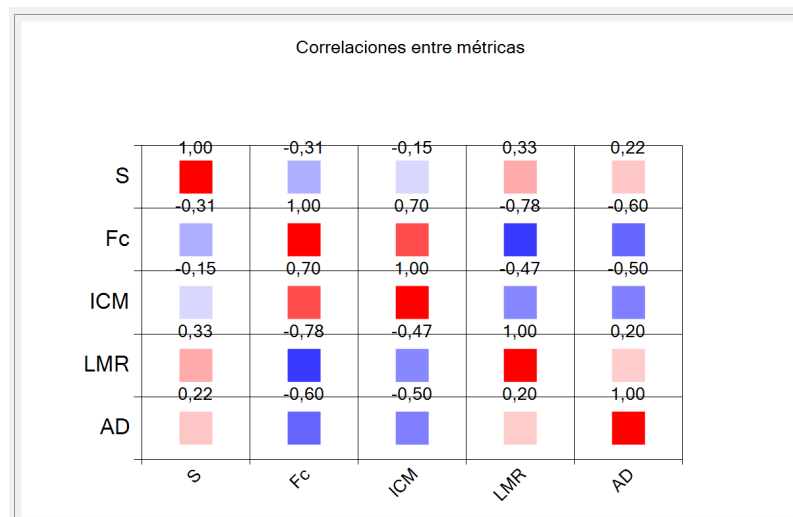
C.2.1. Convex Hull



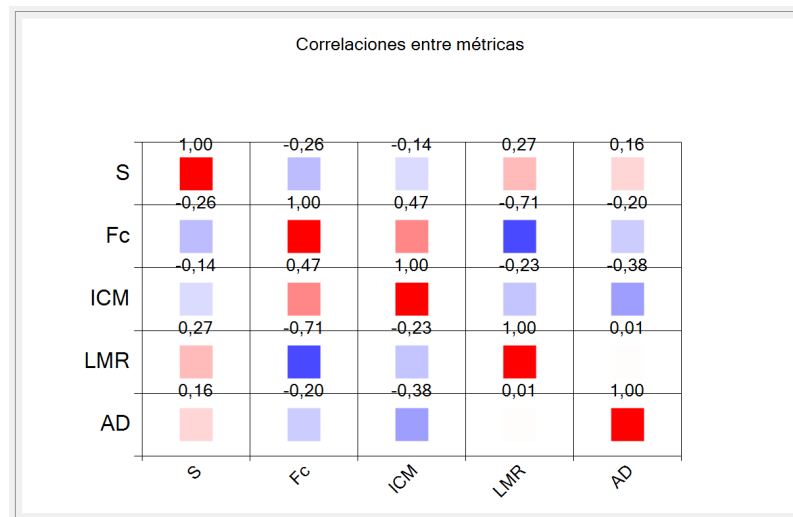
C.2.2. Procedural-X_UniY_Exp



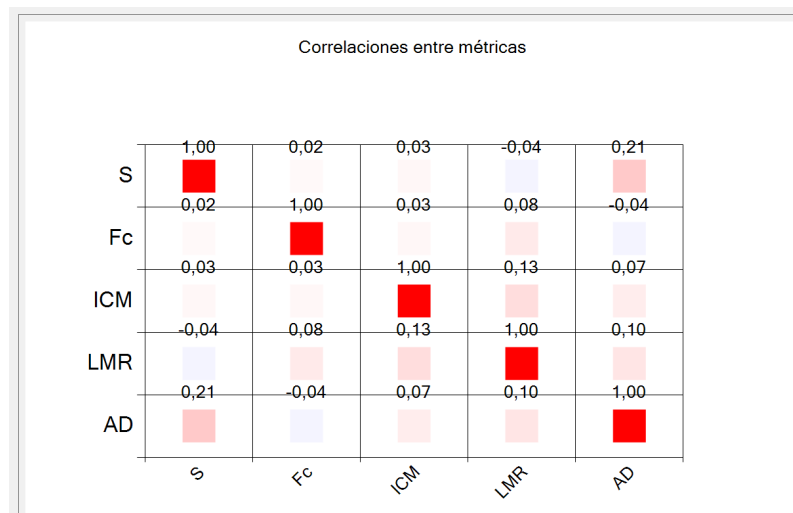
C.2.3. Chaincode_Original



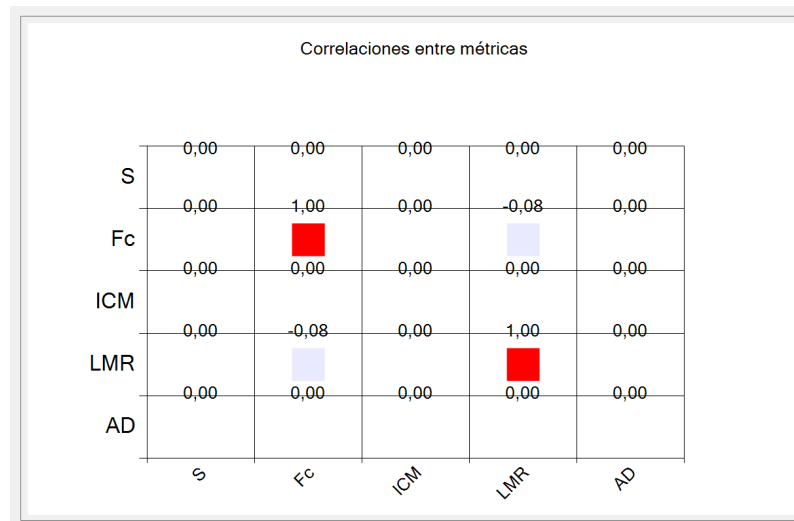
C.2.4. Chaincode_Compleja



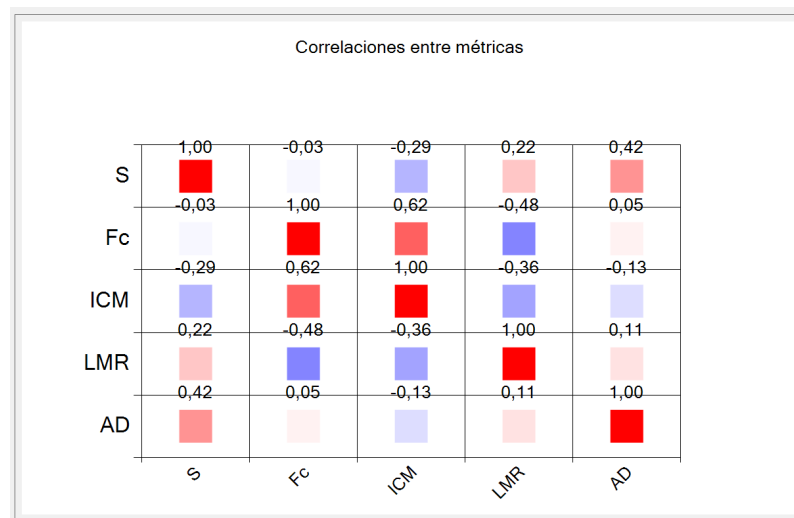
C.2.5. Camilla



C.2.6. IngramT1



C.2.7. IngramT2



C.3. Pistas Vida Real

C.3.1. F1

