



Universidad de Valladolid

Grado en Educación Primaria

TRABAJO FIN DE GRADO

Clasificación con Machine Learning de la actividad cerebral durante los procesos de aprendizaje

Presentando por Manuel Hernández Arranz

Tutelado por: Alfonso García Monge

Valladolid, junio 2025

Indice

1	INTRODUCCIÓN	5
2	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	6
2.1	. La importancia de las emociones en el aprendizaje y su base neurobiológica	6
2.2	. El paradigma approach-avoidance (aproximación-evitación) en neurociencia	6
2.3	. Medición de estados emocionales mediante EEG en contextos educativos	7
2.4	. Educación corporeizada y el rol de las experiencias sensoriales	8
2.5	. Machine Learning aplicado a la clasificación de estados emocionales	9
2.6	. Implicaciones pedagógicas de la neurociencia afectiva	9
3	OBJETIVOS.....	10
3.1	Objetivo general	10
3.2	Objetivos específicos.....	11
4	. METODOLOGÍA	11
4.1	. Registro	11
4.2	Pre-procesado:	12
4.3	Modelo de Clasificación: Bosque Aleatorio (Random Forest)	12
4.4	Entrenamiento del Clasificador	13
4.5	Identificación de Características Importantes	13
4.6	Aplicación a Nuevos Datos y Simulación de Interfaz.....	13
4.7	Guía para la interpretación de resultados EEG	14
4.7.1	Tipos de gráficas utilizadas	15
4.7.2	¿Cómo se interpretan las gráficas de violín?.....	15
4.7.3	Conceptos clave para la interpretación.....	16
4.7.4	¿Qué significa la similitud con atracción o rechazo?	16
4.7.5	¿Cómo se interpretan los histogramas y curvas KDE?	16
4.7.6	Consideraciones generales y límites de interpretación	17

5	RESULTADOS.....	17
5.1	. Evaluación del modelo Random Forest	17
5.2	Resultados de la condición: Matemáticas – Explicación concreta.....	20
5.2.1	Distribución de confianza del modelo (Histograma y curva KDE)	20
5.2.2	Análisis de la característica Pz_Gamma_Zscore	22
5.2.3	Análisis de la característica Cz_Gamma_Zscore	23
5.2.4	Análisis de la característica C3_Gamma (Potencia Absoluta)	25
5.2.5	Análisis de la característica Fp1_Gamma_Zscore	26
5.2.6	Análisis de la característica C3_Gamma_Zscore	28
5.2.7	Conclusión integrada de la condición	29
5.3	Resultados de la condición: Matemáticas – Explicación abstracta	29
5.3.1	Distribución de Confianza del Modelo (Histograma y Curva KDE)	30
5.3.2	Análisis de la característica Pz_Gamma_Zscore	32
5.3.3	. Análisis de la característica Cz_Gamma_Zscore	34
5.3.4	. Análisis de la característica C3_Gamma.....	36
5.3.5	Análisis de Fp1 Gamma Z-Score – Gráfica de Violín.....	37
5.3.6	Análisis de C3 Gamma Z-Score (Gráfica de Violín)	39
5.3.7	Conclusión Final e Implicaciones Pedagógicas	40
5.4	Resultados de la condición: Lengua – Explicación concreta	41
5.4.1	Distribución de Confianza del Modelo (Histograma y Curva KDE)	42
5.4.2	Análisis de la característica Pz_Gamma_ZScore – Lengua Concreto	44
5.4.3	Análisis de la característica Cz_Gamma_ZScore – Lengua Concreto.....	46
5.4.4	Análisis de C3 Gamma – Lengua Concreto	48
5.4.5	Análisis de Fp1 Gamma Z-Score – Lengua Concreto.....	49
5.4.6	Análisis de C3 Gamma Z-Score – Lengua Concreto	51
5.4.7	Conclusión Final e Implicaciones Pedagógicas – Lengua Concreto.....	52

5.5	Resultados de la condición: Lengua – Explicación abstracta	53
5.5.1	Distribución de Confianza del Modelo (Histograma y Curva KDE)	54
5.5.2	Análisis de Pz Gamma Z-Score – Lengua Abstracto	56
5.5.3	Análisis de la característica Cz_Gamma_Zscore	58
5.5.4	Análisis de la característica C3_Gamma.....	60
5.5.5	Análisis de la característica Fp1_Gamma_Zscore	61
5.5.6	. Análisis de la característica C3_Gamma_Zscore	63
5.5.7	Conclusión Final e Implicaciones Pedagógicas – Lengua Abstracto	64
6	CONCLUSIÓN FINAL	66
7	Bibliografía.....	68

1 INTRODUCCIÓN

Hoy más que nunca, la educación se enfrenta a un desafío apasionante: comprender cómo aprenden los estudiantes más allá de lo que simplemente se observa en el aula. ¿Qué sucede dentro del cerebro de un niño cuando se siente motivado... o, por el contrario, frustrado ante una explicación? ¿Es posible, a través de datos neurofisiológicos, detectar ese momento en que una tarea escolar despierta atracción o provoca rechazo emocional?

Este trabajo se sitúa precisamente en ese cruce tan estimulante como complejo entre la pedagogía y la neurociencia. Su propósito es adentrarse en las respuestas emocionales cerebrales que acompañan a distintos enfoques de enseñanza.

Todo partió de una hipótesis tan sugerente como poco investigada: ¿y si los mismos mecanismos neuronales que nos hacen disfrutar o no de un estímulo sensorial simple, como una imagen bonita o desgradable, también influyen en cómo vivimos emocionalmente las tareas escolares? En otras palabras, ¿existe una conexión funcional entre el placer sensorial y eso que podríamos llamar “interés académico”? Si esta idea se confirmara, sus implicaciones para la práctica educativa serían enormes: podríamos diseñar estrategias que no solo enseñen, sino que inspiren, que activen positivamente nuestras emociones mientras aprendemos.

Para poner a prueba esta intuición, se desarrolló un estudio experimental con tres estudiantes del grado de educación primaria. Se combinaron registros de actividad cerebral mediante electroencefalografía (EEG) con un modelo de aprendizaje automático (Random Forest), entrenado para identificar patrones neuronales de atracción y rechazo. El estudio se dividió en dos fases: una primera con estímulos visuales emocionalmente contrastantes (imágenes agradables y desagradables) para entrenar el modelo, y una segunda en la que se analizaron diferentes explicaciones académicas (concretas y abstractas, en áreas como matemáticas y lengua) para ver si las respuestas emocionales ante el contenido escolar compartían rasgos neuronales con las emociones básicas.

Este trabajo, lejos de ofrecer verdades definitivas, se presenta más bien como una prueba de concepto. Un primer paso, riguroso pero limitado por el tamaño de la muestra y los recursos técnicos, hacia una pregunta crucial para la educación del siglo XXI:

¿Cómo se siente aprender?

Y más aún: ¿cómo podemos enseñar para que aprender, simplemente, se sienta bien?

Con esta mirada, el estudio no se limita a analizar datos. Pretende, además, abrir un espacio de conversación entre la neurociencia y la pedagogía, con la esperanza de que estas investigaciones contribuyan a construir entornos educativos más inspiradores, más humanos... y, sobre todo, más eficaces.

2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 . La importancia de las emociones en el aprendizaje y su base neurobiológica

En las últimas décadas, los avances en neurociencia han puesto en evidencia algo que durante mucho tiempo se intuía, pero no se había demostrado con claridad: las emociones no son simples acompañantes del pensamiento, sino piezas clave que influyen directamente en cómo aprendemos. Tal como destacan Tyng, Amin, Saad y Malik (2017), “la emoción tiene una influencia sustancial en los procesos cognitivos en humanos, incluyendo percepción, atención, aprendizaje, memoria, razonamiento y resolución de problemas” (p. 1). Esta mirada ha transformado profundamente nuestra comprensión de los mecanismos a través de los cuales los estudiantes asimilan y conservan conocimientos.

El cerebro, en este sentido, gestiona las emociones mediante un entramado de estructuras interconectadas. La amígdala, situada dentro del sistema límbico, cumple un rol crucial como centro primario en la evaluación emocional, reaccionando con rapidez ante estímulos y asignándoles un valor afectivo, ya sea positivo o negativo. En paralelo, la corteza prefrontal, especialmente en sus áreas ventromedial y dorsolateral, se encarga de regular esas respuestas emocionales e integrarlas con funciones cognitivas más complejas (Davidson, 2004). Esta comunicación constante entre las zonas subcorticales y corticales es lo que determina, en última instancia, cómo las vivencias emocionales condicionan nuestra capacidad para aprender.

Además, se ha comprobado que ciertas emociones positivas, como la curiosidad o el entusiasmo, pueden potenciar la consolidación de la memoria, ya que activan el sistema dopamínérgico, el cual fortalece los lazos sinápticos. Por el contrario, cuando predominan emociones negativas intensas como el miedo o la ansiedad excesiva, se activa el eje hipotálamo-pituitario-adrenal. Este proceso libera cortisol, una hormona que, en niveles altos, compromete el funcionamiento del hipocampo y entorpece la formación de nuevos recuerdos (Vogel & Schwabe, 2016).

Todo esto no es solo teoría; tiene implicaciones muy reales en el ámbito educativo. Comprender cómo las emociones afectan el aprendizaje ofrece a los docentes herramientas valiosas para diseñar entornos que favorezcan estados emocionales positivos. Se trata, en definitiva, de crear espacios donde las emociones funcionen como aliadas del aprendizaje, y no como barreras.

2.2 . El paradigma approach-avoidance (aproximación-evitación) en neurociencia

El paradigma de aproximación-evitación (approach-avoidance) se ha consolidado como uno de los marcos teóricos más sólidos para explicar cómo las personas reaccionan emocional y motivacionalmente ante distintos estímulos. De acuerdo con la Teoría de la Sensibilidad al Refuerzo (RST), propuesta por Gray y posteriormente enriquecida por Corr (2008), el comportamiento

humano estaría guiado por dos sistemas motivacionales clave: por un lado, el Sistema de Activación Conductual (BAS), encargado de impulsar la aproximación hacia estímulos deseables; y por otro, el Sistema de Inhibición Conductual (BIS), que modula las respuestas de evitación frente a estímulos percibidos como amenazantes o desagradables.

Esta dualidad motivacional se manifiesta también a nivel neurofisiológico, en lo que se conoce como asimetría frontal. Davidson (2004) fue uno de los primeros en demostrar que la activación del hemisferio frontal izquierdo se asocia con emociones vinculadas a la aproximación, mientras que la del hemisferio frontal derecho se relaciona más bien con emociones orientadas a la evitación o el repliegue. Esta diferencia puede observarse mediante registros de electroencefalografía (EEG), evaluando la variación en la potencia de la banda alfa (8-13 Hz) entre electrodos situados en regiones homólogas de ambos hemisferios.

Harmon-Jones y Gable (2018) retomaron y actualizaron esta perspectiva, destacando que “la asimetría frontal cortical relativa mayor izquierda se asocia con mayor motivación de aproximación, mientras que la asimetría frontal cortical relativa mayor derecha se asocia con mayor motivación de evitación” (p. 1). Lo interesante es que estos patrones no sólo reflejan estados emocionales pasajeros, sino que también pueden anticipar tendencias conductuales y reacciones afectivas a futuro.

Desde una mirada educativa, este enfoque cobra una relevancia especial. Las tareas académicas que despiertan emociones de aproximación, como la curiosidad, el entusiasmo o la expectativa positiva, generan una activación cerebral distinta a la de aquellas que provocan emociones de evitación, como la ansiedad o el rechazo. Y es que, al identificar estos patrones mediante EEG, se abre la puerta a una comprensión más precisa y objetiva de cómo los estudiantes responden emocionalmente ante diversos estímulos del entorno educativo.

2.3 . Medición de estados emocionales mediante EEG en contextos educativos

En los últimos años, la electroencefalografía (EEG) se ha posicionado como una herramienta sumamente valiosa para investigar las respuestas emocionales en tiempo real durante el proceso de aprendizaje. Esta técnica, no invasiva por naturaleza, permite registrar la actividad eléctrica del cerebro mediante electrodos ubicados en el cuero cabelludo, capturando las oscilaciones neuronales que reflejan diferentes estados tanto cognitivos como emocionales.

Estas señales EEG se descomponen en distintas bandas de frecuencia, cada una asociada con funciones específicas. Las ondas delta (0.5-4 Hz) se vinculan al sueño profundo; las theta (4-8 Hz), con estados meditativos y el procesamiento de la memoria; las alfa (8-13 Hz), con momentos de relajación y atención tranquila; las beta (13-30 Hz), con un estado de alerta activa y procesamiento cognitivo; y, por último, las gamma (30-100 Hz), con funciones más complejas como el procesamiento consciente y la integración perceptual (Lindsay, 2020).

Dentro del estudio de emociones ligadas al paradigma aproximación-evitación, la banda alfa en la región frontal del cerebro adquiere un papel especialmente importante. Cuando se observa

una supresión de la actividad alfa , es decir, una reducción en su potencia, se interpreta como un aumento en la activación cortical. Así, una mayor supresión de alfa en el hemisferio frontal izquierdo en comparación con el derecho sugiere una predisposición hacia la aproximación, mientras que el patrón inverso se asocia con una tendencia a la evitación.

A esto se suma el enorme potencial de la inteligencia artificial para decodificar estos complejos patrones neuronales. Técnicas como el algoritmo Random Forest permiten clasificar con gran precisión los estados emocionales a partir de la actividad cerebral. Tal como apuntan Vistorte et al. (2024), “la integración de inteligencia artificial para evaluar emociones en ambientes de aprendizaje representa un avance significativo en la comprensión objetiva de los procesos afectivos educativos” (p. 3). El valor de Random Forest radica en su capacidad para manejar la alta dimensionalidad de los datos EEG , con múltiples canales y bandas de frecuencia, y, al mismo tiempo, identificar qué características son más relevantes para diferenciar entre distintos estados emocionales.

2.4 . Educación corporeizada y el rol de las experiencias sensoriales

La educación corporeizada (embodied education) parte de una idea poderosa y, a menudo, olvidada: el aprendizaje no es una actividad exclusiva del cerebro, sino un proceso que involucra al cuerpo entero y a su constante interacción sensorial con el entorno. Como afirman Correa, Agila, Pulamarín y Palacios (2012), “la sensación y percepción son procesos fundamentales en la construcción del conocimiento, actuando como puentes entre el mundo físico y nuestra comprensión mental del mismo” (p. 126).

Este enfoque tiene raíces profundas en la neurociencia. Numerosos estudios han demostrado que las redes neuronales activadas durante experiencias sensoriales reales pueden volver a activarse, al menos en parte, cuando evocamos esos momentos a través del recuerdo o la imaginación. Por ejemplo, Cook y Tanenhaus (2009) mostraron que “los gestos de los hablantes no solo comunican información, sino que también afectan las acciones posteriores de los oyentes, sugiriendo una conexión corporeizada entre percepción y acción” (p. 98). Es decir, nuestro cuerpo no solo expresa, también moldea lo que entendemos.

Desde la óptica educativa, esto abre un horizonte interesante: las experiencias sensoriales ricas (visuales, auditivas, táctiles) pueden dejar huellas de memoria más estables y fáciles de recuperar. Un color vibrante, un sonido agradable (o incluso incómodo), una textura suave o áspera... todos estos estímulos provocan respuestas emocionales que pueden favorecer o entorpecer el aprendizaje. La neurociencia ha mostrado que tales experiencias no activan únicamente las cortezas sensoriales primarias, sino también regiones asociativas encargadas de integrar información de distintos sentidos junto con su carga emocional.

Comparar las respuestas cerebrales ante estímulos sensoriales simples y tareas académicas complejas, como plantea esta investigación, representa una propuesta verdaderamente novedosa. Si se detectan patrones neuronales similares ,ya sea de atracción o rechazo, en ambos contextos, estaríamos ante una evidencia de que los mecanismos emocionales básicos operan tanto en lo

sensorial como en lo intelectual. Y esto, sin duda, subraya la necesidad de tener muy en cuenta la dimensión corporal y sensorial en el diseño de experiencias educativas más significativas.

2.5 . Machine Learning aplicado a la clasificación de estados emocionales

La complejidad inherente a las señales EEG , con múltiples canales captando actividad simultánea en distintas bandas de frecuencia, representa un verdadero desafío a nivel analítico. Y es aquí donde las herramientas de aprendizaje automático, en especial el algoritmo Random Forest, aportan soluciones realmente potentes, capaces de detectar patrones sutiles que muchas veces pasan desapercibidos en un análisis convencional.

Random Forest, un método de aprendizaje supervisado, funciona construyendo múltiples árboles de decisión durante la fase de entrenamiento, y luego realiza su clasificación final a partir del voto mayoritario de esos árboles individuales. Su resistencia al sobreajuste y su eficacia para manejar datos de alta dimensionalidad lo convierten en una opción especialmente adecuada para el tratamiento de señales EEG. Además, tiene la ventaja añadida de ofrecer métricas de importancia de características, lo que permite identificar con claridad qué zonas cerebrales y qué bandas de frecuencia resultan más relevantes a la hora de diferenciar estados de atracción o rechazo.

En el marco de esta investigación, se ha entrenado un modelo Random Forest utilizando un conjunto de 250 características extraídas de registros EEG obtenidos a través de 32 canales. El objetivo: encontrar patrones que distingan, de forma consistente, entre respuestas de aproximación y de evitación. Para garantizar que los resultados no sean producto del azar ni específicos de la muestra analizada, se ha aplicado un proceso de validación cruzada que asegura la generalización del modelo a nuevos datos.

2.6 . Implicaciones pedagógicas de la neurociencia afectiva

Los descubrimientos provenientes de la neurociencia afectiva tienen implicaciones profundas y quizás transformadoras para la práctica educativa. Como subraya Bueno (2017), “comprender cómo el cerebro procesa las emociones y cómo estas influyen en el aprendizaje permite diseñar estrategias pedagógicas más efectivas y humanas” (p. 45). Esta afirmación no solo resalta la importancia del conocimiento neurocientífico, sino que invita a repensar la forma en que abordamos la enseñanza.

Si llegamos a confirmar que las respuestas neuronales de atracción y rechazo ante estímulos sensoriales comparten rasgos con aquellas que se producen frente a tareas académicas, entonces podríamos comenzar a aplicar principios del diseño sensorial para enriquecer la experiencia educativa. Por ejemplo, si ciertos patrones de activación frontal se asocian con un mayor grado de involucramiento emocional, podríamos intencionalmente diseñar materiales y actividades que propicien ese tipo de estado mental.

Además, la posibilidad de medir las respuestas emocionales de manera objetiva mediante EEG representa un avance notable. Ya no sería necesario depender exclusivamente de lo que los estudiantes dicen sentir o de lo que se observa externamente; podríamos, en tiempo real, detectar cuándo están atravesando emociones que favorecen el aprendizaje, o que, por el contrario, lo bloquean, lo cual permitiría intervenciones más precisas y oportunas.

Para que todo esto se traduzca en una transformación real del aula, es fundamental que estos conocimientos lleguen a los docentes. Incluir formación básica sobre el impacto de las emociones en el aprendizaje neuronal permitiría a los educadores diseñar entornos donde se cultiven estados afectivos positivos, reduciendo al mismo tiempo aquellos que limitan el potencial de los estudiantes.

En definitiva, lo que plantea esta base teórica es claro: las emociones, lejos de ser un elemento periférico, son componentes centrales del aprendizaje, y pueden ser observadas a través de patrones específicos de activación cerebral. La convergencia entre neurociencia afectiva, educación corporeizada y análisis computacional abre nuevas posibilidades para comprender, y sobre todo, mejorar la experiencia educativa. Una oportunidad, quizás, para replantear de raíz cómo enseñamos y aprendemos en este siglo XXI.

3 OBJETIVOS

Este trabajo forma parte de una investigación experimental más amplia centrada en el estudio de las respuestas emocionales frente a estímulos sensoriales. Sin embargo, el presente análisis se enfoca exclusivamente en el sentido de la vista. Su propósito es profundizar en cómo se configuran los procesos emocionales que subyacen a la atracción o el rechazo que pueden sentir los estudiantes hacia ciertas tareas académicas, y explorar si estas reacciones comparten patrones neuronales con las respuestas provocadas por estímulos visuales agradables o desagradables. Para ello, se utilizarán registros EEG y modelos de clasificación basados en Random Forest, aplicados a estudiantes del grado de educación primaria.

3.1 Objetivo general

Explorar si las respuestas neuronales asociadas a sensaciones de atracción y rechazo ante estímulos visuales presentan similitudes con las respuestas emocionales que generan determinadas tareas escolares, utilizando para ello electroencefalografía (EEG) y técnicas de clasificación automática mediante Random Forest.

3.2 Objetivos específicos

1. Identificar patrones de actividad cerebral , registrados mediante EEG, vinculados a respuestas de atracción y rechazo ante imágenes visuales con carga emocional positiva o negativa.
2. Registrar y analizar la actividad cerebral durante la realización de tareas académicas previamente valoradas como agradables o desagradables, diferenciándolas de las respuestas a estímulos puramente visuales.
3. Diseñar, entrenar y validar un modelo de aprendizaje automático (Random Forest) que permita clasificar estados emocionales de aproximación y evitación a partir de los datos EEG recogidos.
4. Determinar qué regiones cerebrales y qué bandas de frecuencia son más relevantes para la clasificación emocional, tanto en la experiencia sensorial visual como en la académica.
5. Proponer orientaciones pedagógicas fundamentadas en los hallazgos neurofisiológicos, con el fin de diseñar experiencias educativas que promuevan estados emocionales que faciliten el aprendizaje.

4 . METODOLOGÍA

4.1 . Registro

En el marco de un estudio más amplio que exploró las respuestas emocionales ante estímulos agradables y desagradables presentados a través de los cinco sentidos (vista, oído, olfato, gusto y tacto), se grabaron señales EEG de 8 participantes. En una primera instancia, todos los participantes registraron datos de todos los sentidos, utilizando material sensorial seleccionado según sus preferencias individuales.

Sin embargo, el presente trabajo se enfoca exclusivamente en el análisis de los datos obtenidos del sentido de la vista. Para ello, se utilizaron imágenes con valencia emocional positiva (como fotografías de bebés, niños o animales) y negativa (como escenas de animales en descomposición), proporcionadas por el tutor, Alfonso.

4.2 Pre-procesado:

Extracción de Características: Para que el computador pudiera analizar las señales, extrajimos de pequeños segmentos de EEG un conjunto de características numéricas en el dominio de la frecuencia. Estas características resumen información relevante de la actividad cerebral, como la densidad de potencia espectral de diferentes ritmos cerebrales (delta, theta, alpha, beta bajo, beta alto y gamma) en 32 localizaciones del cuero cabelludo (Cz, Fz, Fp1, F7, F3, FC1, C3, FC5, FT9, T7, TP9, CP5, CP1, P3, P7, O1, Pz, Oz, O2, P8, P4, CP2, CP6, TP10, T8, FT10, FC6, C4, FC2, F4, F8, Fp2). En total, se calcularon 250 características para cada segmento de EEG. Cada segmento fue etiquetado como "atraccion" o "rechazo" según la valoración de los participantes.

4.3 Modelo de Clasificación: Bosque Aleatorio (Random Forest)

Para la tarea de clasificación, elegimos un método de aprendizaje automático llamado Bosque Aleatorio (Random Forest). Imaginemos que queremos identificar un estado mental. En lugar de confiar en un solo "experto" (que sería un único árbol de decisión y podría equivocarse fácilmente), un Bosque Aleatorio consulta a un gran número de "expertos" diferentes (muchos árboles de decisión, cada uno entrenado con una vista ligeramente distinta de los datos). El modelo calcula la importancia de cada característica basada en la reducción del índice de Gini a través de los árboles. Luego, combina las opiniones de todos estos expertos para tomar una decisión final más robusta y fiable sobre si un segmento de EEG corresponde a "atraccion" o "rechazo". Este enfoque es conocido por funcionar bien con muchos datos y características, ser menos propenso a errores por detalles específicos de los datos de entrenamiento, y además nos puede indicar qué características fueron más importantes para su decisión.

Utilizamos la implementación estándar de este método. Se configuró una semilla aleatoria (random_state=42) para garantizar la reproducibilidad de los resultados. El modelo consta de 100 árboles de decisión y emplea una técnica llamada bootstrap o muestreo con reemplazo, que consiste en generar múltiples subconjuntos del conjunto de datos original tomando muestras aleatorias, donde una misma observación puede aparecer varias veces. Esta técnica permite construir árboles diversos y robustos. No se ha limitado la profundidad máxima de los árboles, y se ha empleado el criterio de Gini para medir la calidad de las divisiones internas. La evaluación se ha realizado mediante un conjunto de prueba independiente y validación cruzada con cinco particiones (KFold), utilizando la precisión (accuracy) como métrica principal. Asimismo, se ha analizado la importancia relativa de las características del modelo para identificar cuáles contribuyen más a distinguir entre los estados de atracción y rechazo.

4.4 Entrenamiento del Clasificador

Aprendizaje: El modelo de Bosque Aleatorio fue entrenado utilizando una gran parte de los datos de características EEG obtenidas específicamente durante la exposición a estímulos visuales (imágenes agradables y desagradables) por parte de los participantes uno, dos y tres. A cada segmento se le asignó una etiqueta correspondiente ("atracción" o "rechazo") en función de la valencia emocional percibida. Durante este proceso de entrenamiento, el modelo aprendió a reconocer patrones en los valores de las características que permitían distinguir entre ambos estados emocionales.

-División de Datos: Para asegurar una evaluación justa, dividimos nuestros datos iniciales: una parte se usó para entrenar el modelo (conjunto de entrenamiento) y otra parte, que el modelo no vio durante el aprendizaje, se reservó para evaluarlo después (conjunto de prueba).

Evaluación del Rendimiento del Clasificador. Medimos su rendimiento usando indicadores es-tándar:

-Exactitud (Accuracy): El porcentaje total de veces que el modelo acertó en su clasificación (ya sea atracción o rechazo).

-Precisión y Sensibilidad (Recall): Indicadores que nos dicen qué tan bien identificó específicamente cada estado. Por ejemplo, la sensibilidad para "atracción" mide cuántos de los momentos reales de atracción fueron correctamente identificados.

-Puntuación F1: Una métrica combinada que balancea la precisión y la sensibilidad.

-Matriz de Confusión: Una tabla que visualiza cuántas veces acertó y cuántas veces confundió una clase con la otra.

-Validación Cruzada: Para confirmar que el rendimiento no fue casualidad debido a la división específica de datos, aplicamos una técnica llamada validación cruzada. Esto implica repetir el proceso de entrenamiento y prueba varias veces usando diferentes porciones de los datos para entrenar y probar en cada repetición. Luego, calculamos el rendimiento promedio, lo que nos da una estimación más fiable de cómo funcionaría el modelo con datos completamente nuevos.

4.5 Identificación de Características Importantes

El modelo de Bosque Aleatorio nos permitió identificar qué características del EEG (de las 250 iniciales) fueron las más útiles e informativas para diferenciar entre "atracción" y "rechazo". Esto puede dar pistas sobre los indicadores cerebrales más relevantes para estos estados.

4.6 Aplicación a Nuevos Datos y Simulación de Interfaz

Prueba de Generalización: Aplicamos el modelo ya entrenado a un conjunto de datos completamente nuevo, correspondiente a un registro diferente. En mi caso particular, utilicé segmentos EEG obtenidos durante explicaciones del tutor. En concreto, se emplearon dos explicaciones sobre el número π —una presentación abstracta y otra versión corporeizada-narrativa— y dos explicaciones sobre los sustantivos —una presentación igualmente abstracta y otra corporei-

zada-narrativa. Estos datos se seleccionaron con el fin de comprobar si el modelo podía generalizar su rendimiento y clasificar correctamente estados emocionales no vistos durante el entrenamiento.

Simulación de Interfaz: Para ilustrar una posible aplicación práctica, desarrollamos una demostración visual (simulada dentro de nuestro entorno de análisis, Google Colab). Esta demostración cargaba el modelo entrenado, procesaba segmentos de datos nuevos (representados por sus características), y mostraba la clasificación resultante ("ATRACCION" o "RECHAZO") para cada segmento de forma visual, utilizando por ejemplo, barras de color cuya longitud indicaba la confianza del modelo en esa predicción. Esto sirve como un prototipo conceptual de cómo el clasificador podría funcionar en un escenario más aplicado.

El modelo de clasificación Random Forest, entrenado con señales EEG correspondientes a estímulos visuales agradables y desagradables, ha sido diseñado para distinguir entre estados emocionales de atracción y rechazo. Una vez entrenado y evaluado, este modelo se aplicó a nuevos datos EEG obtenidos durante el visionado de explicaciones académicas, con el fin de analizar si estas provocaban patrones neuronales similares a los observados durante la fase sensorial.

Antes de presentar los resultados detallados, es necesario introducir una guía interpretativa que permita comprender de manera clara y accesible el significado de las gráficas utilizadas. Esta guía ha sido diseñada específicamente para facilitar la lectura de los resultados a cualquier lector, incluso sin formación técnica previa, y constituye una herramienta clave para una interpretación pedagógica rigurosa.

4.7 Guía para la interpretación de resultados EEG

Con el objetivo de facilitar la lectura e interpretación de las gráficas utilizadas en este estudio, esta guía ofrece una explicación accesible de los conceptos clave que sustentan el análisis de señales EEG mediante técnicas de aprendizaje automático. Está pensada especialmente para que cualquier lector, incluso sin formación previa en neurociencia o estadística, pueda comprender qué representa cada visualización, cómo se infieren estados de atracción o rechazo emocional y cuál es la relevancia de estos hallazgos en el ámbito educativo.

4.7.1 Tipos de gráficas utilizadas

Las representaciones visuales se agrupan en dos formatos principales:

- **Histogramas con curva de densidad (KDE):** muestran la distribución general de las probabilidades de atracción que el modelo asigna a un nuevo conjunto de datos EEG.
- **Gráficas de violín:** comparan características específicas de la actividad cerebral entre las clases aprendidas durante el entrenamiento (atracción/rechazo) y las respuestas a nuevos estímulos educativos.

Introducción general

Durante la fase de entrenamiento, el modelo Random Forest fue entrenado para clasificar segmentos EEG como representativos de estados emocionales de “atracción” o “rechazo”, a partir de la exposición a imágenes con carga emocional positiva o negativa.

Más adelante, en la etapa de análisis, se introdujeron nuevos datos correspondientes al visionado de explicaciones académicas (por ejemplo, contenidos de matemáticas o lengua, en distintos formatos). El objetivo es observar si esos nuevos registros generan patrones neuronales similares a los previamente asociados con atracción o rechazo emocional.

4.7.2 ¿Cómo se interpretan las gráficas de violín?

Las gráficas de violín muestran la distribución de valores para una característica cerebral concreta (como la actividad gamma en un electrodo específico), en distintos contextos. En este caso, se comparan:

- Segmentos EEG etiquetados como “atracción” (imágenes agradables).
- Segmentos etiquetados como “rechazo” (imágenes desagradables).
- Nuevos registros EEG tomados durante el visionado de explicaciones académicas (sin etiquetas previas).

Cada gráfica refleja:

- **La forma de la distribución:** zonas más anchas indican mayor concentración de valores.
- **La línea central:** representa la mediana, es decir, el valor medio de la muestra.
- **El rango intercuartílico (IQR):** muestra el 50 % de los datos centrales.
- **Colas:** indican los valores más extremos, excluyendo posibles valores atípicos.

En este contexto, si la distribución del nuevo estímulo se asemeja a la de la clase “atracción”, puede interpretarse como una respuesta emocional positiva.

4.7.3 Conceptos clave para la interpretación

- **Mediana:** marca el centro de la distribución. Si coincide o se acerca a la de la clase “atracción”, sugiere una respuesta similar a la generada por estímulos agradables.
- **Rango Intercuartílico (IQR):** indica la consistencia. Un IQR estrecho señala una respuesta cerebral más estable, mientras que uno amplio refleja mayor variabilidad.
- **Desviación estándar:** muestra cuán dispersos están los datos. Una desviación baja indica homogeneidad emocional; una alta puede revelar ambivalencia o falta de enfoque emocional.

4.7.4 ¿Qué significa la similitud con atracción o rechazo?

La interpretación se basa en comparar la distribución del nuevo estímulo con las clases de referencia. Se consideran tres criterios:

- **Mediana** parecida a la de “atracción” → posible activación emocional positiva.
- **IQR contenido en el de “atracción”** → respuesta coherente con esa clase.
- **Baja desviación estándar** → activación estable y sostenida.
- Si los valores se parecen más a “rechazo” o muestran alta dispersión → experiencia emocional más ambigua o incluso negativa.

En resumen, cuanto mayor sea la coincidencia global con el patrón de atracción, más probable es que el estudiante haya vivido esa explicación como emocionalmente motivadora. Esta interpretación, claro está, no es definitiva, sino una herramienta para explorar el impacto emocional de distintos formatos de enseñanza.

4.7.5 ¿Cómo se interpretan los histogramas y curvas KDE?

Antes de analizar características concretas, se presenta un histograma con curva KDE que muestra cómo se distribuyen las probabilidades de atracción asignadas por el modelo a cada segmento del nuevo estímulo EEG:

- **Eje X:** probabilidad de pertenencia a la clase “atracción” (de 0.0 a 1.0).
- **Eje Y:** número de segmentos que recibieron esa probabilidad.
- **Curva azul (KDE):** suaviza el histograma para mostrar la tendencia general.
- **Línea roja:** indica la media de las probabilidades asignadas.

Interpretación práctica:

- Curva centrada en valores altos (>0.7): el modelo tiene alta confianza en que se trata de atracción.
- Distribución cercana a 0.5: ambigüedad emocional.
- Alta dispersión: el estímulo provoca respuestas variadas (algunas positivas, otras neutras o negativas).

Estadísticas complementarias:

- **Media y mediana:** resumen del nivel general de atracción.
- **Mínimo y máximo:** rango de probabilidades asignadas.
- **Desviación estándar:** mide la homogeneidad emocional de la respuesta.

Una media cercana a 0.5 con baja desviación sugiere una reacción neutra pero consistente; si la desviación es alta, puede indicar ambivalencia. Por el contrario, una media elevada con baja dispersión apunta a una respuesta claramente positiva.

4.7.6 Consideraciones generales y límites de interpretación

Las gráficas permiten observar tendencias emocionales a nivel cerebral, pero no deben interpretarse como reflejo directo de emociones conscientes ni como diagnóstico individual. El análisis parte de patrones aprendidos por el modelo y se basa en similitudes estadísticas, no en afirmaciones categóricas.

Es esencial considerar todos los indicadores en conjunto (mediana, IQR, desviación estándar) y no de forma aislada. Solo así se obtiene una visión equilibrada del perfil emocional evocado por cada estímulo.

5 RESULTADOS

5.1 . Evaluación del modelo Random Forest

El modelo Random Forest entrenado con señales EEG centradas en el sentido de la vista mostró un rendimiento excepcional. Logró una precisión del 100 % al clasificar correctamente los 87 segmentos utilizados para su evaluación (44 asociados a atracción y 43 a rechazo). Las métricas

estándar , precisión, recall y F1-score, alcanzaron un valor perfecto (1.00) en ambas clases, lo que indica una capacidad total para distinguir entre estados emocionales en los datos analizados.

La matriz de confusión [[44, 0], [0, 43]] refleja que no se cometieron errores de clasificación, lo cual sugiere una separación clara entre los patrones neuronales de atracción y rechazo.

En cuanto a la validación cruzada (5-fold), los resultados también fueron muy sólidos: cuatro de los cinco pliegues alcanzaron un 100 % de precisión y uno, un 98.9 %. La media fue de 0.998 con una desviación estándar de ± 0.005 . Este nivel de estabilidad indica que el modelo no solo es preciso, sino también robusto frente a distintas particiones aleatorias del conjunto de datos. Como explican Stone (1974) y Mosteller & Tukey (1968), la validación cruzada k-fold permite evaluar la capacidad de generalización del modelo en datos no vistos durante el entrenamiento, lo que añade fiabilidad al análisis.

Este procedimiento consiste en dividir los datos en cinco subconjuntos iguales; en cada ronda, uno se utiliza para evaluar el modelo, mientras los otros cuatro se usan para entrenarlo. Este proceso se repite cinco veces, alternando el conjunto de evaluación, y se calcula el promedio final de las métricas obtenidas.

A pesar de los resultados alentadores, es importante señalar que todos los datos provinieron de solo tres participantes. Esto implica un posible riesgo de sobreajuste intra-sujeto, es decir, que el modelo haya aprendido patrones particulares de esas personas, en lugar de características generalizables. Por eso, se recomienda que futuras investigaciones adopten validaciones más exigentes, como la técnica “leave-one-subject-out”, en la que se entrena el modelo con los datos de dos sujetos y se evalúa con el tercero, repitiendo el proceso para cada combinación. Esta estrategia permitiría comprobar si el modelo realmente reconoce patrones emocionales más allá de los individuos específicos utilizados en el entrenamiento (Lachenbruch & Mickey, 1968; Esterman et al., 2009).

Relevancia de las características EEG

Desde una perspectiva neurofuncional, los resultados ofrecen pistas interesantes. La alta relevancia de la banda gamma en zonas como Cz y Pz sugiere una integración sensorial eficiente, posiblemente vinculada a la valoración emocional de estímulos visuales. El vértez (Cz), al encontrarse en una posición central del cuero cabelludo, actúa como un nodo de integración entre regiones frontales, parietales y temporales. Su activación gamma se ha relacionado con procesos cognitivos complejos, atención sostenida y evaluación afectiva de imágenes (Tallon-Baudry, 2009; Fries, 2015), en línea con los hallazgos de Ardila et al. (2015) sobre la función integradora del área 37.

En cuanto a la región frontal, los electrodos Fp1, Fp2, FC1 y FC6 resultaron clave. En particular, Fp1 y FC1 , ubicados en el hemisferio izquierdo, suelen asociarse con estados de aproximación, mientras que Fp2 y FC6 , en el hemisferio derecho, se vinculan con emociones de evitación

(Davidson, 1998; Harmon-Jones, 2004). La actividad gamma y high-beta en estas zonas sugiere que el modelo está utilizando estas señales para discriminar entre respuestas emocionales positivas y negativas. Además, investigaciones recientes (Clos et al., 2013) muestran que el área de Broca (área 44), cercana a FC6, tiene una organización funcional más compleja de lo que se creía, lo que podría explicar su implicación en tareas afectivas.

Por último, la activación en la región temporal izquierda (electrodo T7) puede interpretarse como un reflejo de la evocación de contenidos con carga emocional o narrativa, incluso ante estímulos visuales. Esta área está relacionada con el procesamiento del lenguaje, las emociones sociales y la memoria episódica, lo que sugiere que algunas imágenes pudieron despertar pensamientos internos como “esto me gusta” o “esto me incomoda” (Olson et al., 2007; Ralph et al., 2017). Rosselli et al. (2015) también destacan el papel del giro angular (área 39) como nodo de integración entre redes lingüísticas y afectivas, reforzando su relevancia en contextos educativos emocionalmente cargados.

La falta de relevancia de algunas variables, como Engagement_Fp2, no significa que sean inútiles o irrelevantes. Simplemente indica que, en este contexto específico (evaluación de imágenes agradables vs. desagradables), no aportaron valor predictivo. Sin embargo, su utilidad podría revelarse en otros contextos, tareas o poblaciones.

Que el modelo haya identificado de forma clara ciertas zonas y frecuencias como relevantes respalda la idea de que los estados afectivos frente a estímulos educativos se manifiestan de manera coherente en la actividad cerebral. Esto resulta especialmente valioso para el diseño de experiencias de aprendizaje más atractivas y emocionalmente significativas. La neuroeducación ha demostrado que las emociones favorecen la atención, la memoria y la retención del contenido (Araya-Pizarro & Espinoza Pastén, 2020; Cedeño et al., 2024).

Conclusión metodológica

En conjunto, los resultados muestran que el modelo entrenado fue capaz de clasificar con precisión los estados de atracción y rechazo visual, alcanzando métricas perfectas tanto en la evaluación directa como en la validación cruzada. No obstante, la limitada cantidad de participantes invita a interpretar estos resultados con cautela en cuanto a su generalización.

En cuanto a las características EEG más relevantes, se confirmó la importancia de la actividad gamma en regiones centrales y frontales para discriminar emociones positivas y negativas. Estos hallazgos refuerzan la validez neurofisiológica del enfoque y sientan una base sólida para las interpretaciones pedagógicas que se desarrollan en las secciones siguientes del TFG.

5.2 Resultados de la condición: Matemáticas – Explicación concreta

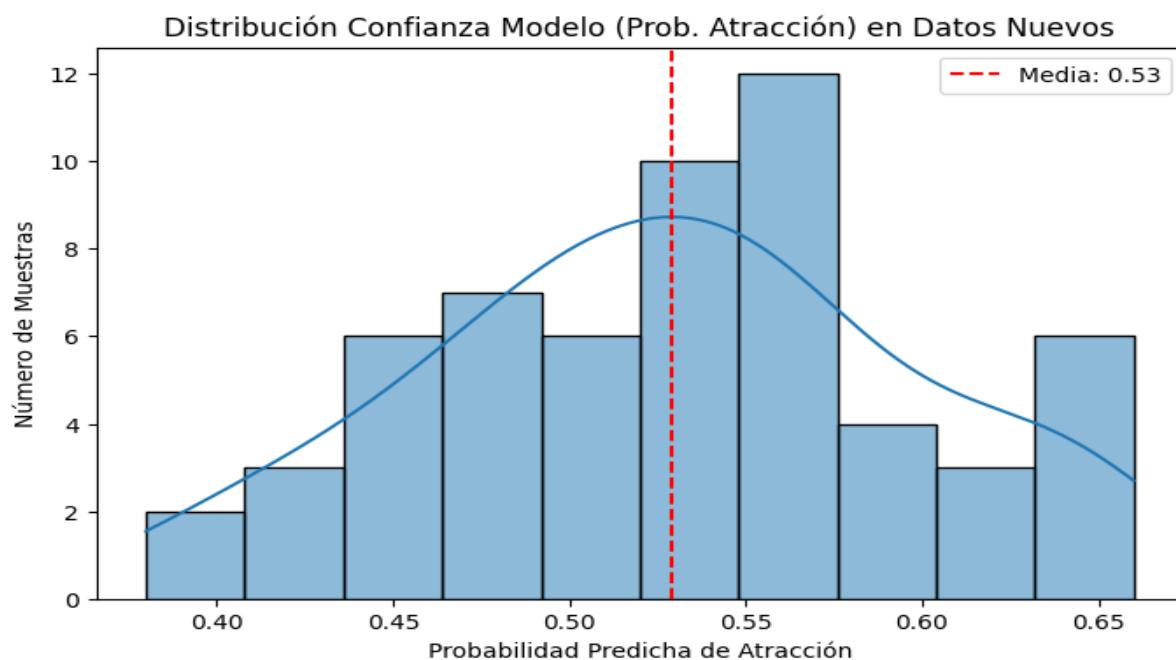
Contexto del análisis

Este análisis evalúa cómo responde el modelo de clasificación entrenado exclusivamente con señales EEG obtenidas durante la exposición a estímulos visuales con carga emocional, imágenes consideradas agradables o desagradables. El entrenamiento se realizó a partir de los registros de tres participantes (identificados como uno, dos y tres), cuyas señales fueron previamente etiquetadas según sensaciones de “atracción” o “rechazo” visual.

Una vez entrenado, el modelo se aplica a un nuevo conjunto de datos EEG pertenecientes al participante uno, quien, además, es el autor de este trabajo. Estos datos fueron recogidos durante el visionado de una explicación sobre el número π , diseñada con un enfoque narrativo y expresivo. La presentación buscaba facilitar la comprensión del concepto mediante un lenguaje accesible y el uso de ejemplos visuales significativos.

El propósito de este análisis es comprobar si el modelo, cuyo aprendizaje se basó únicamente en respuestas emocionales ante estímulos visuales, interpreta estos nuevos registros EEG como representativos de un estado de atracción o de rechazo. Además, se examina el grado de confianza con el que realiza dicha clasificación, lo que puede aportar indicios sobre cómo se vivió emocionalmente la experiencia de aprendizaje.

5.2.1 Distribución de confianza del modelo (Histograma y curva KDE)



Estadísticas de la probabilidad de atracción

- Media: 0.529
- Mediana: 0.530
- Mínimo: 0.380
- Máximo: 0.660
- Desviación estándar: 0.070

El análisis de las probabilidades predichas por el modelo Random Forest, aplicadas a la explicación narrativa del número π , muestra una media y una mediana de 0.53. Esta coincidencia sugiere que la distribución de las predicciones es bastante simétrica, sin inclinaciones marcadas hacia valores extremos —ni excesivamente altos ni bajos—.

El rango de valores va desde un mínimo de 0.38 hasta un máximo de 0.66. El límite inferior, por debajo del umbral de decisión estándar (0.50), indica que algunos segmentos fueron clasificados con baja probabilidad de atracción. Sin embargo, el valor superior sugiere que otros momentos de la explicación generaron una respuesta claramente positiva desde el punto de vista emocional.

La desviación estándar, de 0.070, aunque baja, refleja cierta variabilidad en las respuestas. Esta oscilación puede estar vinculada a factores internos de la propia explicación: cambios en el tono, variaciones en el ritmo o diferencias en el tipo de contenido presentado. También podría deberse a cómo esos elementos fueron percibidos emocionalmente por el estudiante en distintos momentos.

Interpretación general

Tomando estos datos en conjunto, la media ligeramente superior a 0.50 sugiere que el modelo tiende a clasificar la explicación como emocionalmente atractiva, aunque de manera moderada. No se trata de una respuesta intensamente positiva, pero sí de una inclinación clara hacia el lado del interés y la aceptación, con un grado razonable de estabilidad.

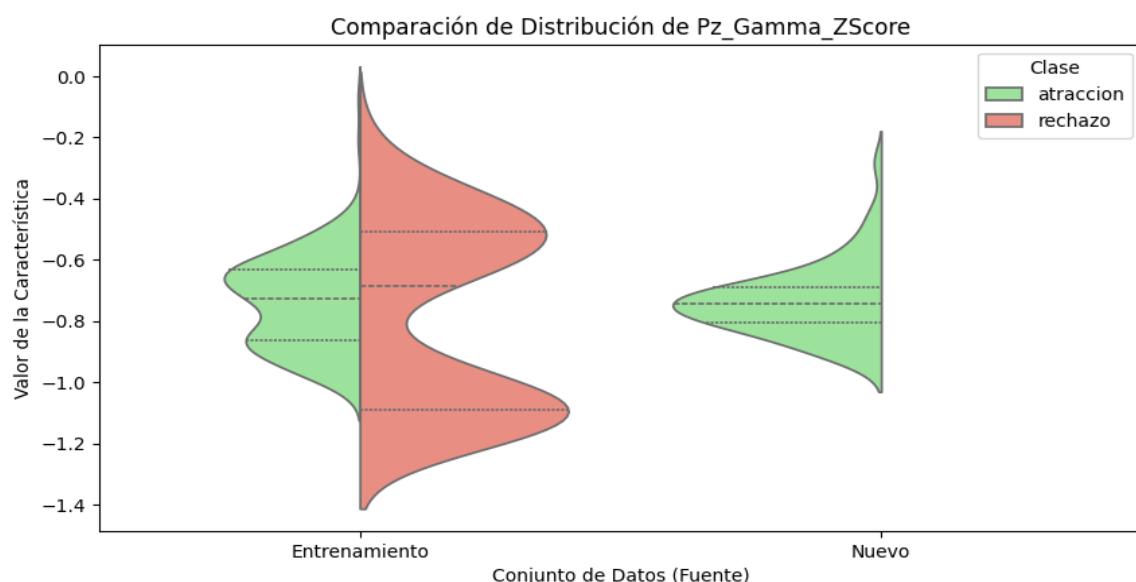
Implicaciones pedagógicas

Desde una mirada neuroeducativa, este patrón sugiere que la explicación narrativa del número π logra despertar una activación emocional tenue pero favorable. No genera rechazo, lo cual ya es relevante considerando la naturaleza abstracta del contenido, pero tampoco alcanza niveles de entusiasmo marcados.

Lo interesante aquí es que el enfoque narrativo parece funcionar como un amortiguador emocional, suavizando la posible resistencia que suele generar este tipo de contenido matemático. Es un punto de partida prometedor: muestra que es posible conectar emocionalmente con los estudiantes, incluso en temas tradicionalmente percibidos como difíciles.

Será especialmente útil observar si este patrón se mantiene, se intensifica o se diluye cuando se analice la versión más abstracta de la misma explicación, aspecto que se abordará más adelante en el trabajo

5.2.2 Análisis de la característica Pz_Gamma_Zscore



Tal como se explicó en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana representa el valor central de la distribución de datos, mientras que el rango intercuartílico (IQR) señala dónde se concentra la mayoría de las respuestas. En este caso concreto, la mediana del nuevo segmento EEG (-0.744) coincide casi exactamente con la mediana correspondiente a los segmentos etiquetados como “atracción” durante la fase de entrenamiento (-0.739), lo que ya anticipa una alta similitud.

Además, el IQR del nuevo segmento está completamente contenido dentro del IQR de la clase “atracción” y no se solapa con el de la clase “rechazo”. Esta coincidencia refuerza aún más la idea de que el patrón cerebral observado se asemeja al que el modelo reconoce como una respuesta emocional positiva.

En cuanto a la dispersión, la desviación estándar fue de 0.117, la más baja entre las tres condiciones analizadas. Esto indica una respuesta cerebral muy homogénea a lo largo de la explicación, sin oscilaciones significativas ni señales de ambivalencia. En otras palabras, la experiencia fue estable y emocionalmente clara.

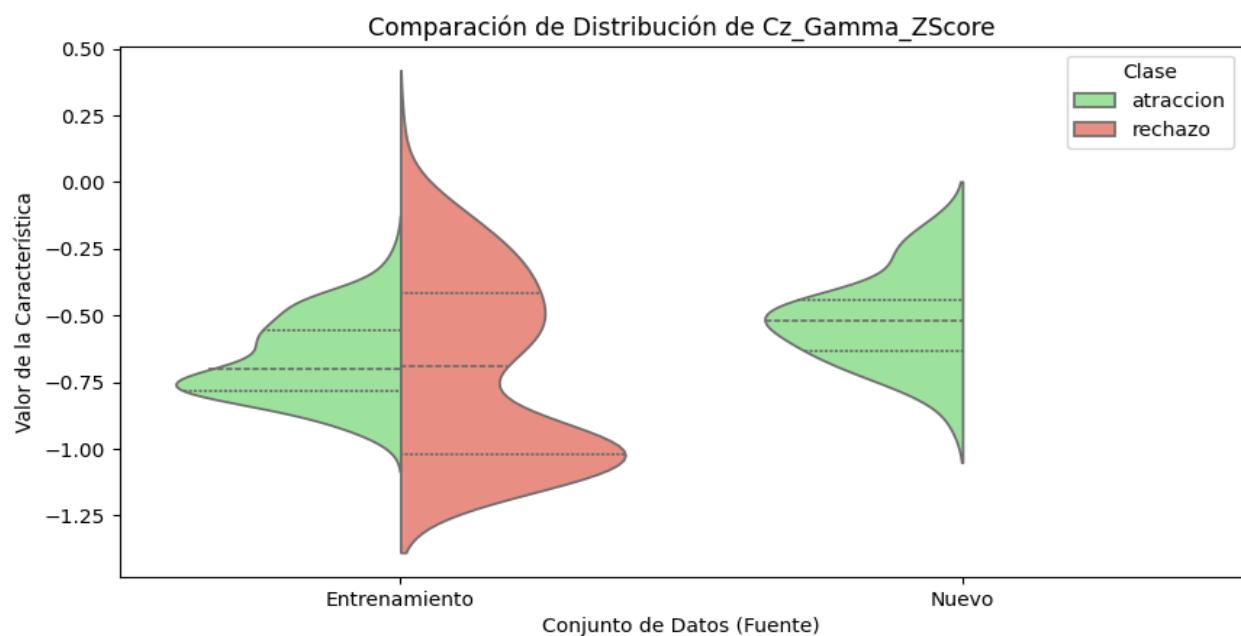
Todo esto sugiere que el cerebro del estudiante respondió a esta explicación de manera muy similar a como lo haría ante un estímulo visual agradable. La actividad registrada fue consistente, centrada y alineada con un estado emocional positivo. No se detectaron signos de rechazo ni de confusión afectiva.

Significado neurofuncional y educativo

La actividad gamma en la región Pz se asocia con funciones de integración visual-espacial y con el mantenimiento del enfoque atencional. Según Rosanova et al. (2009), en la corteza parietal —específicamente en el área de Brodmann 7, las frecuencias gamma suelen ser naturalmente bajas. Por ello, una activación destacada en esta región puede interpretarse como un marcador sólido de implicación afectiva y sensorial.

Que este patrón coincida con la clase “atracción” sugiere que los elementos visuales del vídeo (gestualidad, uso del color, movimiento) consiguieron captar la atención de forma eficaz y agradable. En este contexto, esta variable parece funcionar como una especie de ancla emocional positiva dentro del modelo, indicando que el canal visual fue especialmente efectivo a la hora de generar agrado y compromiso emocional.

5.2.3 Análisis de la característica Cz_Gamma_Zscore



Tal como se explicó en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana del nuevo segmento EEG (-0.518) se encuentra notablemente por encima de las medianas observadas en las clases de “atracción” (-0.702) y “rechazo” (-0.690). Esto sugiere una respuesta menos negativa que ambas condiciones de entrenamiento, aunque no necesariamente positiva.

En cuanto al rango intercuartílico (IQR), el del nuevo segmento está completamente contenido dentro del IQR correspondiente a la clase “rechazo” y no se solapa con el de “atracción”, lo que refuerza la similitud con una respuesta de evitación. Por su parte, la desviación estándar (0.167) es baja, lo cual indica que la actividad cerebral fue estable a lo largo de toda la explicación, sin grandes fluctuaciones.

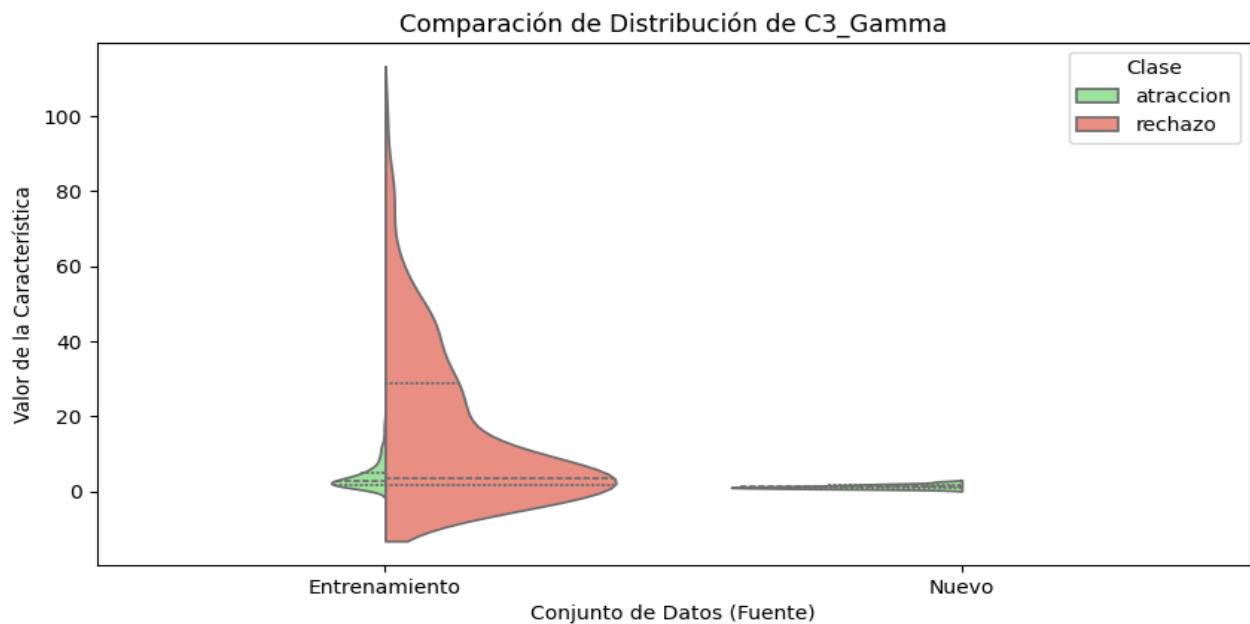
Esta combinación de indicadores sugiere que, aunque el patrón fue consistente, los valores se alinean más con la clase de rechazo que con la de atracción. Esto podría interpretarse como una experiencia emocionalmente neutra o incluso levemente negativa. Es posible que el contenido generara cierta sobrecarga cognitiva, lo que dificultó una conexión afectiva más positiva. La activación gamma observada en Cz apunta a un nivel alto de procesamiento cognitivo, pero con escasa implicación emocional. En este caso, el estudiante podría haber estado prestando atención, aunque sin lograr un vínculo emocional significativo con el contenido.

Significado neurofuncional y educativo

El electrodo Cz se sitúa en el vértez, una región central implicada en la integración sensorial y el procesamiento cognitivo de alto nivel. Según Cottone et al. (2016), las áreas cerebrales cercanas a Cz, como la corteza motora y somatosensorial (áreas de Brodmann 1, 2, 3 y 4), muestran variaciones en la actividad gamma asociadas con tareas que requieren integración sensorimotora compleja.

En este contexto, la tendencia de esta señal hacia patrones de evitación podría estar reflejando una sobrecarga cognitiva. Esta interpretación se alinea con la Teoría de la Carga Cognitiva (Sweller, 1998), que advierte sobre los efectos negativos de un exceso de información o complejidad en la comprensión eficaz de los contenidos. Es posible que, aunque la explicación captara la atención, la densidad conceptual o la forma de presentación impidieran una conexión emocional fluida.

5.2.4 Análisis de la característica C3_Gamma (Potencia Absoluta)



Tal como se detalló en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana del nuevo segmento EEG (1.159) está por debajo de las medianas registradas tanto para la clase "atracción" (2.846) como para la de "rechazo" (3.474). Esto significa que la intensidad general de la activación cerebral durante la explicación fue menor en comparación con las condiciones analizadas en la fase de entrenamiento.

Sin embargo, al observar el rango intercuartílico (IQR), se aprecia que el del nuevo segmento queda completamente incluido dentro del rango de la clase "atracción" y no se solapa con el de "rechazo", lo que refuerza la cercanía del patrón a una respuesta emocional positiva.

Por otro lado, la desviación estándar (0.492) fue la más baja entre las condiciones comparadas, indicando que la respuesta cerebral fue bastante estable durante toda la explicación, sin grandes variaciones.

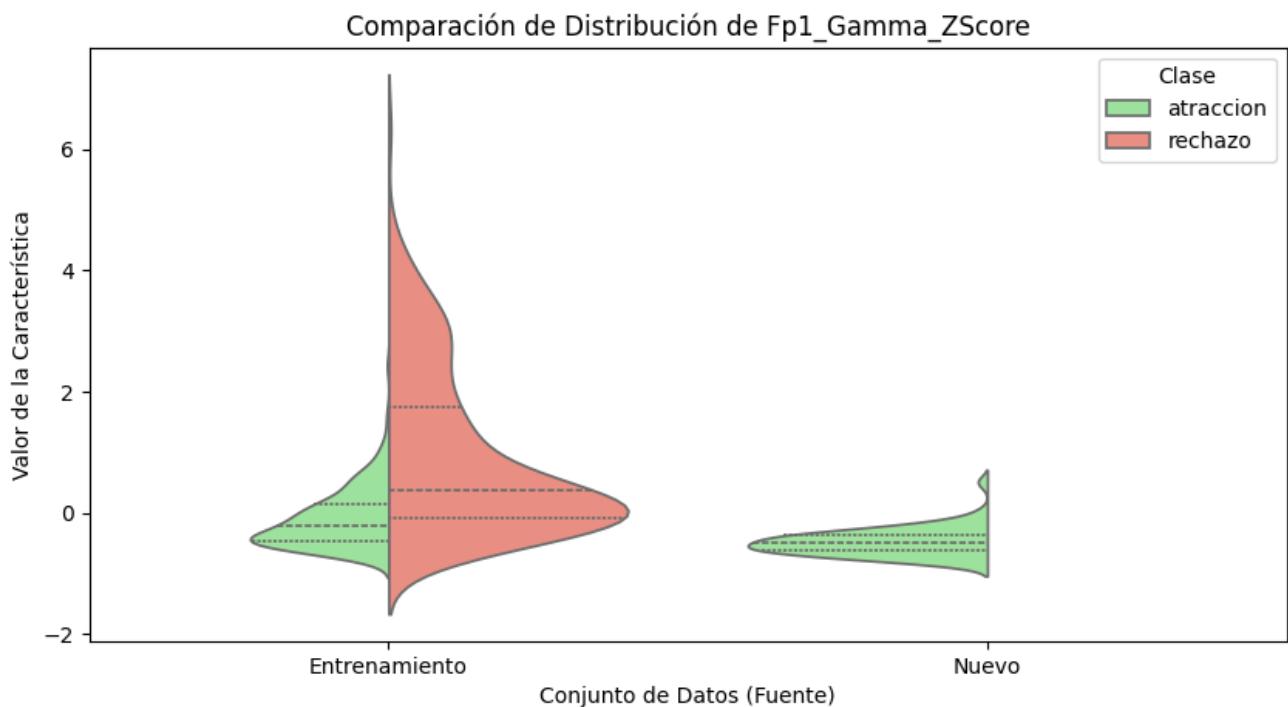
Aunque en términos absolutos la activación gamma fue menor que en las condiciones iniciales, su patrón coincide claramente con el perfil de la clase "atracción", tanto en forma como en distribución. Esto apunta a una respuesta emocional moderadamente positiva: quizás no demasiado intensa, pero sí constante y coherente a lo largo del tiempo. Esta estabilidad sugiere que el estudiante mantuvo una actitud receptiva hacia el contenido, aunque sin alcanzar niveles muy altos de implicación emocional.

Significado neurofuncional y educativo

La región cerebral registrada por el electrodo C3 está relacionada con funciones de preparación motora e imaginación corporal. En concreto, la corteza motora primaria (área de Brodmann 4), situada cerca de esta zona, muestra habitualmente actividad gamma superior a la de las regiones somatosensoriales cercanas (Cottone et al., 2016). Esta activación puede indicar que el estudiante estaba "simulando" de forma corporal lo que observaba, quizás imaginando movimientos o gestos relacionados con la explicación de π .

Aunque el nivel de activación refleja un grado aceptable de implicación cognitivo-motora, existe un claro margen para mejorar. Potenciar esta dimensión podría fortalecer la conexión emocional y mejorar la eficacia educativa de este tipo de explicaciones.

5.2.5 Análisis de la característica Fp1_Gamma_Zscore



Tal como se explicó en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana del nuevo segmento EEG (-0.486) es menor que las medianas observadas en las clases de “atracción” (-0.207) y “rechazo” (0.367). Sin embargo, la relación estructural es claramente más cercana a la clase “atracción”, puesto que el valor se encuentra completamente dentro del rango intercuartílico (IQR) de esta clase (0.610) y no se solapa con el rango de rechazo.

Además, la desviación estándar del nuevo segmento (0.226) es la más baja de las tres condiciones analizadas. Esto indica una señal EEG particularmente homogénea y estable a lo largo de toda la explicación.

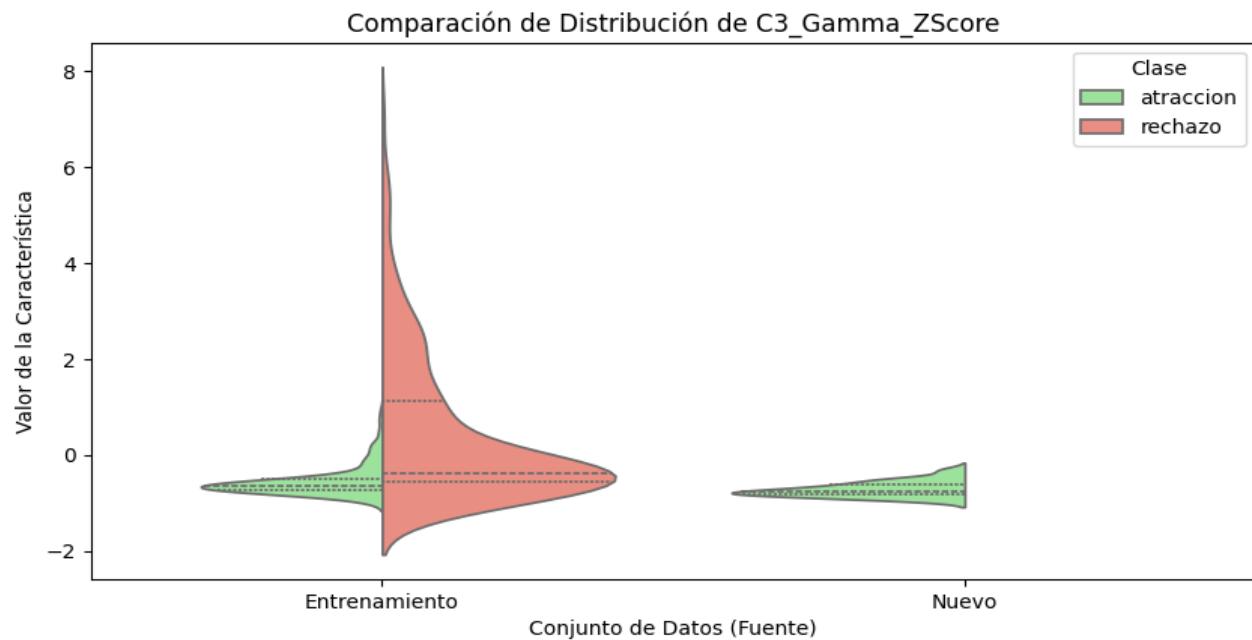
Este patrón sugiere una activación compatible con estados emocionales positivos. Aunque su intensidad es algo menor que la observada ante imágenes visuales agradables, la forma, concentración y separación respecto a la clase rechazo permiten asumir con confianza que el modelo clasificaría esta respuesta como “atracción”. La constancia observada en la señal indica que el estudiante mantuvo un procesamiento emocional sostenido, sin dudas ni ambivalencias.

Significado neurofuncional y educativo

El electrodo Fp1 registra actividad en la corteza prefrontal izquierda, zona clave en procesos de regulación emocional. Diversos estudios han mostrado que la actividad gamma en esta región aumenta durante tareas que requieren control emocional y funciones ejecutivas (Cho et al., 2006; Assem et al., 2022). Por tanto, la activación observada en este estudio sugiere un estado de interés sostenido, sin indicios claros de estrés o incomodidad emocional.

Desde la perspectiva educativa, este resultado refuerza el valor de estrategias pedagógicas como cambios de tono, expresividad facial y gestos enfáticos para captar la atención de manera plácentera y efectiva. Estos métodos están respaldados ampliamente por investigaciones en neuroeducación y aprendizaje emocional (Tokuhama-Espinosa, 2011; Immordino-Yang & Damasio, 2007), y parecen haber sido especialmente efectivos en mantener una implicación positiva durante la explicación analizada.

5.2.6 Análisis de la característica C3_Gamma_Zscore



Tal como se detalló en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana del nuevo segmento EEG (-0.755) se ubica por debajo de la mediana observada en la clase "atracción" (-0.631) y aún más lejos de la clase "rechazo" (-0.390). Esto sugiere una activación más intensa en comparación con ambas condiciones previas.

El rango intercuartílico (IQR) del nuevo segmento es particularmente estrecho (0.203) y se encuentra totalmente incluido dentro del IQR de la clase "atracción" (0.225), sin solaparse en absoluto con el rango asociado al rechazo (1.683). Además, la desviación estándar registrada (0.155) es notablemente baja, indicando una respuesta cerebral especialmente estable y homogénea durante toda la exposición.

En definitiva, este canal muestra un patrón de activación claramente alineado con el estado emocional positivo ("atracción") definido por el modelo. Más aún, la señal no solo refleja una valoración emocional positiva, sino que también indica una alta consistencia en la respuesta emocional del estudiante. Este resultado refuerza aún más la tendencia observada anteriormente en los canales Pz y Fp1.

Significado neurofuncional y educativo

La combinación del Z-Score con la localización sensorimotora sugiere que el estudiante no solo entendió la explicación, sino que estuvo predisposto cognitivamente a interactuar con ella de forma activa. Como señala Cottone et al. (2016), la corteza motora tiende a mostrar mayor potencia en la banda gamma, lo cual refuerza esta interpretación.

Desde el punto de vista educativo, esto resulta especialmente relevante, ya que conecta con principios clave de la neuroeducación, que destacan el vínculo entre movimiento, atención y motivación. Autores como Tokuhama-Espinosa (2011) y Jensen (2008) han subrayado ampliamente la importancia del cuerpo en los procesos de aprendizaje significativo, algo que se refleja claramente en estos resultados.

5.2.7 Conclusión integrada de la condición

La explicación concreta del número π provocó en el estudiante una activación cerebral predominantemente alineada con estados emocionales de atracción. Cuatro de las cinco características analizadas (Pz_Gamma_ZScore, Fp1_Gamma_ZScore, C3_Gamma y C3_Gamma_ZScore) mostraron distribuciones muy claras y coherentes con los patrones neuronales identificados durante el entrenamiento frente a estímulos visuales agradables. Estas señales presentaron medianas cercanas o incluso más pronunciadas que la clase “atracción”, baja variabilidad interna y ningún solapamiento significativo con el patrón de “rechazo”.

Sin embargo, hubo una excepción notable en el canal Cz_Gamma_ZScore, cuyo perfil reflejó cierta ambivalencia. Aunque mostró estabilidad durante la exposición, su proximidad estructural con la clase “rechazo” sugiere que, en algunos momentos, pudo haber existido una sobrecarga cognitiva relacionada con la densidad conceptual o con ciertos pasajes más exigentes de la explicación.

Desde una perspectiva neuroeducativa, estos hallazgos confirman que un enfoque corporeizado y visual-expresivo puede favorecer significativamente la implicación emocional positiva, especialmente en contenidos abstractos como π . Pero también indican que sería recomendable introducir elementos de apoyo visual dinámico o actividades interactivas guiadas para distribuir mejor la carga cognitiva en áreas cerebrales centrales como Cz. Esto facilitaría una integración más equilibrada entre lo sensorial, lo conceptual y lo emocional, maximizando así el impacto positivo de la experiencia educativa.

5.3 Resultados de la condición: Matemáticas – Explicación abstracta

Contexto del análisis

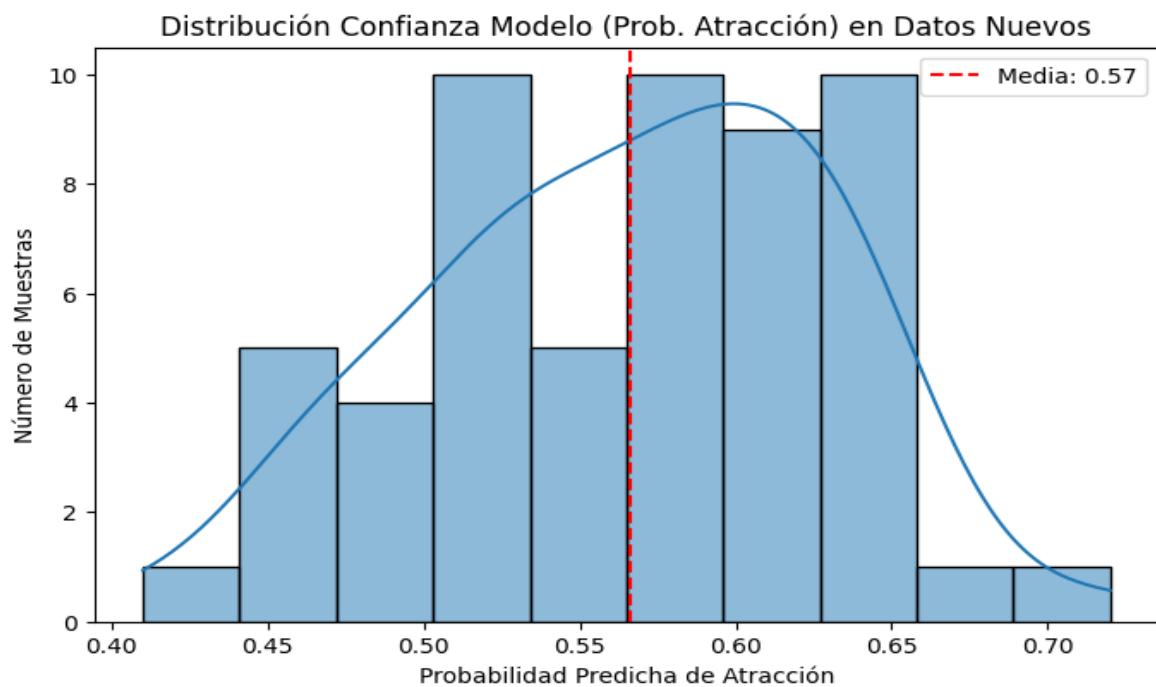
En este análisis se evalúa cómo responde el modelo de clasificación, que fue entrenado únicamente con señales EEG obtenidas mientras los participantes observaban imágenes visuales agradables y desagradables. Este entrenamiento inicial utilizó registros etiquetados según las

sensaciones de “atracción” o “rechazo” visual, recogidas de los tres participantes (identificados como uno, dos y tres).

Ahora, el mismo modelo se aplica a un nuevo conjunto de datos EEG correspondientes al participante uno (quien además es el autor del presente trabajo), obtenidos mientras visualizaba una explicación abstracta sobre el número π . A diferencia de la anterior explicación narrativa, esta presentación tuvo un enfoque más lógico y secuencial, con analogías matemáticas, definiciones formales y un lenguaje notablemente más técnico.

El propósito principal es determinar si el modelo, inicialmente entrenado con estímulos visuales, clasifica estos nuevos datos más cercanos a la categoría de atracción o rechazo emocional, así como la confianza con la que realiza dicha clasificación. Este análisis busca explorar una cuestión clave en neuroeducación: si los contenidos abstractos y más complejos pueden llegar a generar también una activación emocional positiva en estudiantes de primaria, según lo reflejado en sus patrones cerebrales.

5.3.1 Distribución de Confianza del Modelo (Histograma y Curva KDE)



Estadísticas de la probabilidad de atracción

- **Media:** 0.566
- **Mediana:** 0.570
- **Mínimo:** 0.410

- **Máximo:** 0.720
- **Desviación estándar:** 0.064

Descripción general

El análisis de las probabilidades predichas por el modelo Random Forest para la explicación abstracta del número π muestra una media y una mediana de 0.57, con valores que se mueven entre 0.41 y 0.72. La proximidad entre la media y la mediana indica una distribución bastante simétrica, aunque con una leve tendencia hacia valores más elevados (por encima de 0.60). Esto sugiere que el modelo reconoció una cantidad significativa de segmentos como emocionalmente atractivos.

Aunque el valor mínimo (0.41) está por debajo del umbral estándar de 0.50, no es especialmente bajo, mientras que el máximo (0.72) indica que ciertos momentos específicos lograron una respuesta claramente alineada con el patrón de atracción aprendido durante el entrenamiento.

Además, la desviación estándar (0.064), inferior a la observada en la condición concreta, revela una mayor uniformidad en las predicciones, lo que implica que el modelo reaccionó de manera más consistente a los estímulos abstractos.

Interpretación general

La media del 57 % refleja una tendencia moderada, aunque clara, hacia la categoría de “atracción”. Este valor supera ligeramente la neutralidad (0.50) y mejora en cuatro puntos porcentuales al resultado obtenido con la explicación concreta (0.53).

Esta mejora es especialmente interesante: aunque la explicación era más abstracta y técnica, el modelo parece haberla percibido como emocionalmente más positiva. La estabilidad en las predicciones, junto con algunos valores bastante elevados, apoya la hipótesis de que ciertos elementos conceptuales fueron presentados de manera particularmente atractiva y emocionalmente resonante.

Implicaciones pedagógicas

Desde la perspectiva de la neuroeducación, estos hallazgos cuestionan la creencia tradicional de que los contenidos abstractos son automáticamente menos atractivos emocionalmente. De hecho, esta explicación, a pesar de su naturaleza teórica y lógica, consiguió generar una activación emocional positiva, constante y sin señales claras de rechazo.

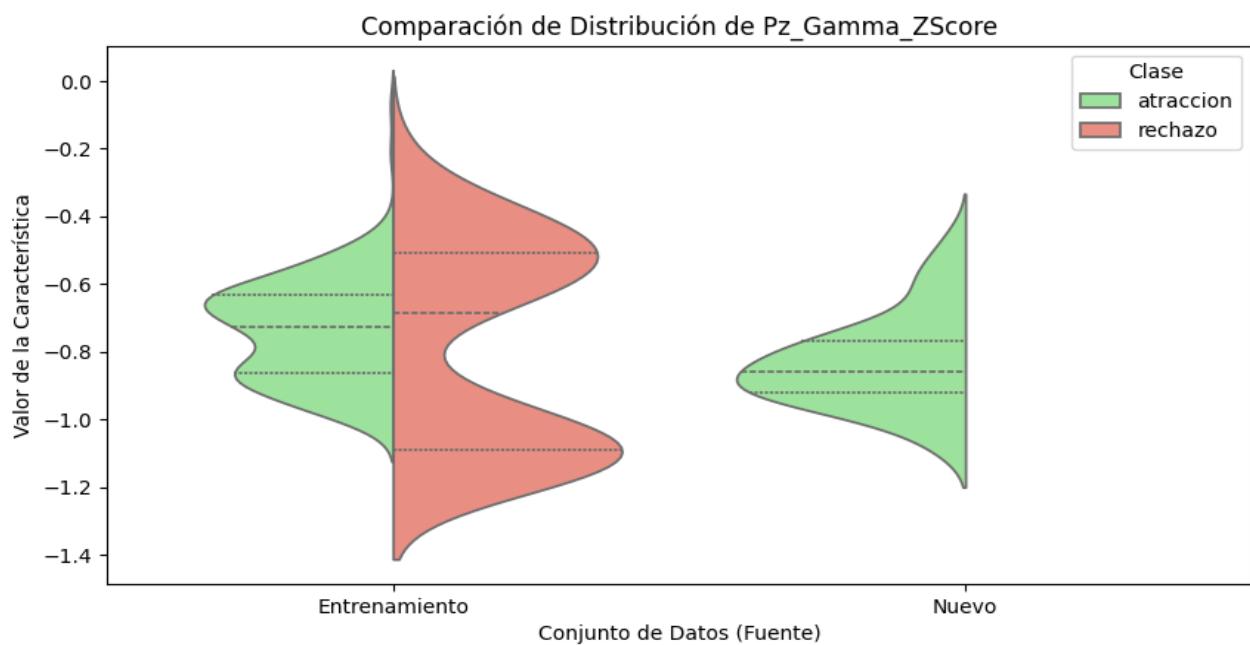
Una posible razón sería el uso eficaz de estructuras lógicas claras, analogías bien elegidas y ejemplos correctamente contextualizados, todos elementos capaces de mantener el interés y reducir la carga cognitiva innecesaria. Tal como indican Sweller (1998) y Tokuhama-Espinosa

(2011), una narrativa cuidadosamente diseñada puede facilitar la comprensión de conceptos complejos sin saturar los recursos atencionales del estudiante.

Además, el hecho de que algunos segmentos alcancen valores bastante altos (hasta 0.72) sugiere que ciertos momentos específicos, quizás introducciones históricas, comparaciones visuales o conexiones con situaciones cotidianas, lograron activar redes afectivas similares a las que aparecen frente a estímulos visuales agradables.

En definitiva, este análisis subraya que en educación lo esencial no es tanto el tipo de contenido (abstracto o concreto), sino cómo se presenta ese contenido. La forma narrativa y el diseño pedagógico pueden marcar la verdadera diferencia en la experiencia emocional del estudiante.

5.3.2 Análisis de la característica Pz_Gamma_Zscore



Tal como se detalló previamente en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana representa el valor central de la distribución, mientras que el rango intercuartílico (IQR) señala el intervalo donde se agrupa la mayoría de los valores registrados.

En este caso concreto, la mediana del nuevo segmento EEG (-0.858) resulta incluso más baja que la mediana observada para la clase “atracción” durante el entrenamiento (-0.725), y claramente distante de la mediana asociada a la clase “rechazo” (-0.687). Esta diferencia sugiere una respuesta emocional aún más marcada hacia el polo de atracción que las respuestas que el modelo había utilizado inicialmente para aprender.

Además, el IQR del nuevo segmento $[-0.934, -0.783]$ queda totalmente contenido dentro del IQR correspondiente a la clase “atracción” (aproximadamente $[-0.840, -0.610]$), sin solaparse en absoluto con el rango de la clase “rechazo”. Esta clara separación refuerza con fuerza la hipótesis de que el patrón cerebral registrado se asemeja estrechamente a experiencias previamente clasificadas como agradables.

La desviación estándar (0.138) del nuevo segmento es ligeramente menor que la desviación estándar registrada en la clase “atracción” durante el entrenamiento (0.151), lo que indica una mayor homogeneidad en la activación cerebral durante esta explicación. Es decir, la señal se mantuvo estable, coherente, y sin oscilaciones importantes ni señales de ambivalencia emocional.

En definitiva, este patrón revela una activación cerebral en la región parietal media que coincide fuertemente con los estados emocionales positivos que el modelo definió durante su fase de aprendizaje inicial. La señal fue constante y centrada, lo que sugiere una implicación emocional positiva sostenida durante toda la explicación del contenido.

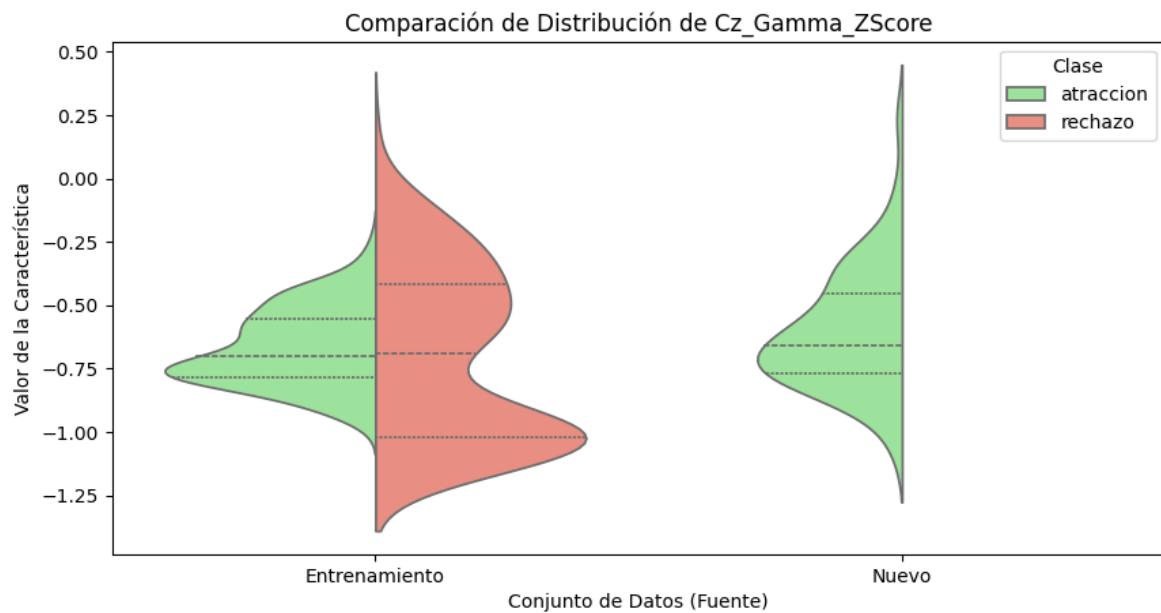
Sorprendentemente, aunque esta explicación del número π fue abstracta, con un enfoque más teórico y menos visual que otros estímulos, la activación cerebral en Pz fue igual o incluso más intensa que ante imágenes visuales agradables. De hecho, el modelo la interpreta claramente como motivadora, lo que pone en cuestión la idea tradicional de que solo los estímulos sensorialmente ricos generan atracción emocional.

Significado neurofuncional y educativo

La actividad gamma registrada en el electrodo Pz se relaciona estrechamente con la integración visoespacial y el mantenimiento sostenido del foco atencional. Según Rosanova et al. (2009), la corteza parietal (en particular el área de Brodmann 7) opera normalmente con frecuencias gamma relativamente bajas, por lo que un aumento sostenido en esta región sugiere una implicación afectiva y visual significativa.

Aunque esta explicación carecía de elementos visuales especialmente llamativos, parece que su claridad discursiva, el uso de analogías efectivas y una estructura argumentativa coherente fueron suficientes para mantener el interés y generar una experiencia emocional agradable de manera prolongada. De esta forma, esta característica se configura como un ancla positiva dentro del modelo, demostrando que la calidad del discurso, incluso en ausencia de recursos visuales impactantes, puede inducir estados de atracción emocional sostenida en contextos educativos.

5.3.3 . Análisis de la característica Cz_Gamma_Zscore



Como se explicó anteriormente en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana indica el valor central de la distribución, mientras que el rango intercuartílico (IQR) representa el intervalo en el que se concentran la mayoría de las respuestas.

En este caso concreto, la mediana del nuevo segmento EEG (-0.658) se encuentra entre las medianas observadas durante el entrenamiento para las clases de “atracción” (-0.702) y “rechazo” (-0.690), aunque algo más próxima a la primera. Esta posición intermedia sugiere que la respuesta cerebral no fue claramente positiva ni negativa, mostrando cierta ambivalencia emocional.

El IQR del nuevo segmento $[-0.816, -0.500]$ está totalmente incluido dentro del rango de “atracción” (aproximadamente $[-0.786, -0.557]$), aunque también se solapa parcialmente (en torno al 65 %) con la clase “rechazo”. Esta superposición refleja de nuevo una ambigüedad afectiva, sin un patrón claramente dominante.

La desviación estándar (0.236) es mayor que en la condición de atracción (0.152), pero inferior a la de rechazo (0.337), lo que indica una activación algo más variable, aunque sin picos extremos ni dispersión asimétrica. Visualmente, la gráfica refleja una distribución simétrica y sin valores atípicos, lo que refuerza la idea de una respuesta cerebral moderadamente estable, aunque no muy polarizada.

En conjunto, la activación registrada en Cz no muestra una alineación clara con ninguna de las dos categorías extremas (atracción o rechazo). Aunque el modelo tiende ligeramente hacia una clasificación como atracción, lo hace con menor confianza que en otras regiones analizadas, como Pz o Fp1. El perfil parece indicar un estado mental implicado pero emocionalmente tenue o neutro.

Significado neurofuncional y educativo

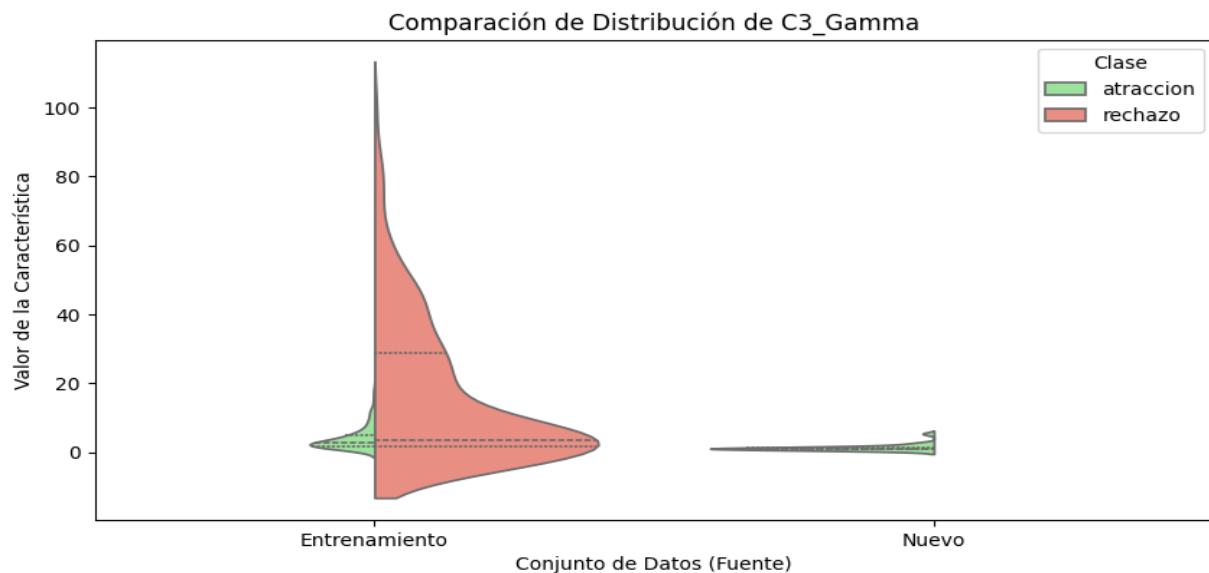
La actividad gamma registrada en el electrodo Cz está relacionada con procesos de integración sensoriomotora y regulación cognitiva bajo condiciones de esfuerzo mental (Clos et al., 2013; Cottone et al., 2016). Esta zona cerebral incluye las áreas de Brodmann 1, 2, 3 y 4, asociadas a las cortezas somatosensorial primaria y motora, donde la actividad gamma suele reflejar integración sensorial multisistema (Rosanova et al., 2009).

En el contexto de una explicación abstracta como la del número π , sin elementos cinestésicos o visuales especialmente llamativos, es posible que esta región haya procesado el contenido de manera más simbólica que sensorial, reduciendo así la claridad emocional percibida (Assem et al., 2022).

Sin embargo, aspectos como el tono pausado, la claridad verbal y la estructura lógica del discurso parecen haber sido suficientes para evitar una reacción negativa, manteniendo la activación dentro de un rango más bien neutro-positivo. Algunos estudios sugieren que este tipo de discurso puede sostener la atención sin inducir emociones especialmente intensas (Davidson, 1998; Cedeño et al., 2024).

Desde la perspectiva neuroeducativa, estos resultados no deben interpretarse como una deficiencia, sino como una oportunidad pedagógica. Aunque la activación en Cz no sea negativa, sí podría potenciarse emocionalmente mediante estrategias adicionales, como la introducción de pausas cognitivas, apoyos visuales breves o anclajes emocionales intermitentes. Como destacan Tokuhama-Espinosa (2011) y Araya-Pizarro & Espinoza Pastén (2020), el sistema emocional y atencional del estudiante necesita variedad para mantener un compromiso más profundo y duradero con el contenido.

5.3.4 . Análisis de la característica C3_Gamma



Como se detalló previamente en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana refleja el valor central de la distribución, mientras que el rango intercuartílico (IQR) delimita el intervalo donde se concentra la mayoría de las respuestas observadas.

En esta característica concreta, la mediana del nuevo segmento EEG (1.115) se encuentra por debajo de las medianas observadas en ambas clases del entrenamiento: “atracción” (2.846) y “rechazo” (3.474). Aunque la intensidad general de la activación es menor, la señal permanece claramente en el rango positivo, indicando una activación funcional relevante, aunque menos pronunciada que en condiciones previas.

El IQR del nuevo segmento EEG [0.883, 1.348] queda contenido dentro del extremo inferior del IQR asociado a la clase “atracción” (aproximadamente [1.339, 4.352]), sin superponerse con la franja principal del patrón de “rechazo” ([-10.148, 17.097], aproximadamente). Esto sugiere una similitud estructural con el patrón de atracción, aunque desde un nivel algo más moderado.

La desviación estándar (0.929) resulta especialmente baja en comparación con las condiciones iniciales de entrenamiento (3.244 para atracción y 20.505 para rechazo), lo que revela una señal muy estable y consistente, sin variaciones extremas. La gráfica en forma de violín, estrecha y sin colas laterales, confirma esta homogeneidad.

En definitiva, estos indicadores apuntan a una activación sensoriomotora leve, pero constante y coherente, sin signos de ambivalencia significativa. Aunque la intensidad de la señal es inferior a la observada frente a estímulos visuales más concretos, el modelo tiende claramente hacia una clasificación como atracción, gracias a la estabilidad y forma del patrón registrado.

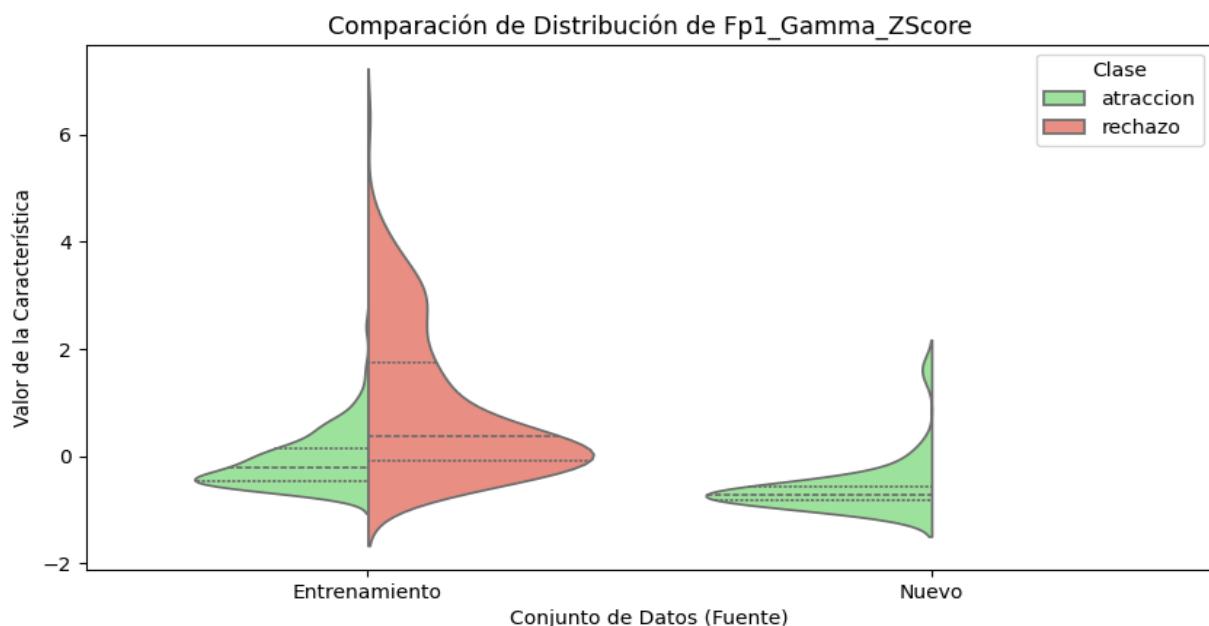
Significado neurofuncional y educativo

El electrodo C3 registra actividad en la corteza sensoriomotora izquierda, que incluye principalmente las áreas de Brodmann 1, 2 y 3 (corteza somatosensorial primaria), y en menor medida, el área 4 (corteza motora primaria). Estas regiones están asociadas al procesamiento táctil y a la planificación voluntaria de movimientos (Rosselli et al., 2015).

La actividad gamma en esta zona, aunque no implique movimiento físico real, se relaciona estrechamente con procesos internos de simulación motora, como imaginar gestos o movimientos relacionados con la manipulación conceptual (Fries, 2015; Cottone et al., 2016). En contextos educativos, este tipo de activación cerebral indica que el estudiante se está preparando mentalmente para interactuar con el contenido, lo cual es esencial para una comprensión más profunda y activa (Immordino-Yang & Damasio, 2007; Tokuhama-Espinosa, 2011).

Aunque la explicación del número π era fundamentalmente teórica y no incluía elementos cinestésicos ni interacción física directa, su claridad estructural, ritmo pausado y enfoque lógico parecen haber facilitado una activación interna de tipo sensoriomotor. Desde una perspectiva pedagógica, esto sugiere que incorporar pequeños recursos corporales o metáforas visuales y motoras podría fortalecer aún más el impacto emocional y la comprensión de explicaciones abstractas, aprovechando el canal sensoriomotor como un recurso didáctico valioso, incluso en contextos teóricos.

5.3.5 Análisis de Fp1 Gamma Z-Score – Gráfica de Violín



Tal como se explicó en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana indica la tendencia central de la activación cerebral registrada, mientras que el rango intercuartílico (IQR) muestra la zona en la que se concentra la mayor parte de los valores. En esta característica concreta, la mediana del nuevo segmento EEG (-0.716) resulta considerablemente más negativa que la mediana registrada en la clase “atracción” durante el entrenamiento (-0.207), y aún más alejada de la clase “rechazo” (0.367). Este desplazamiento sugiere una activación emocional especialmente marcada y claramente diferenciada hacia la categoría de atracción.

El IQR del nuevo segmento EEG $[-0.843, -0.589]$ se encuentra completamente fuera del rango correspondiente a la clase “rechazo” (aproximadamente $[-0.541, 1.276]$), y se alinea firmemente con la zona más negativa del patrón de “atracción” ($[-0.512, 0.098]$, aprox.). Esta configuración refleja una señal estable, coherente y libre de ambigüedades emocionales.

La desviación estándar observada (0.492) se mantiene dentro de un nivel moderado, sugiriendo una respuesta cerebral internamente consistente. Además, la gráfica de violín muestra una forma simétrica y compacta, confirmando la estabilidad del patrón sin picos extremos o discordantes.

En conjunto, esta métrica indica una activación emocional sostenidamente positiva, asociada con experiencias que el modelo reconoce como atractivas con un alto grado de confianza. La distancia respecto al patrón de rechazo es amplia y clara, sin solapamiento alguno entre ambas clases.

Significado neurofuncional y educativo

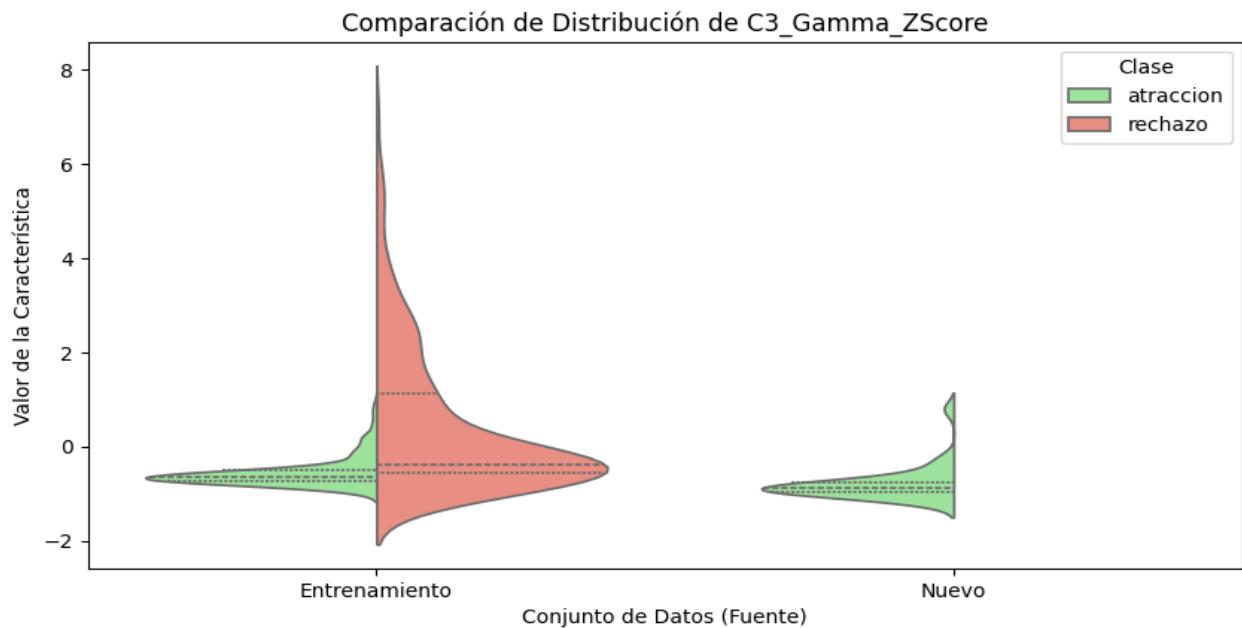
El electrodo Fp1 registra actividad en la corteza prefrontal dorsolateral izquierda, área que incluye principalmente el área de Brodmann 10, junto con las áreas 9 y 46 (Assem et al., 2022; Gilbert et al., 2006). Estas regiones del cerebro están estrechamente vinculadas con funciones cognitivas superiores como el control ejecutivo, la regulación emocional y el mantenimiento de la atención focalizada.

La actividad gamma observada en Fp1 suele interpretarse como una señal de evaluación consciente y positiva frente a la tarea, además de reflejar procesos efectivos de autorregulación emocional, especialmente cuando se enfrenta una carga cognitiva considerable (Davidson, 1998; Harmon-Jones, 2004).

En este estudio específico, la pronunciada negatividad del Z-Score y su estabilidad interna sugieren que el estudiante mantuvo una implicación frontal intensa, pero emocionalmente bien regulada, con una orientación claramente positiva hacia la experiencia educativa. A pesar del contenido abstracto de la explicación del número π , el patrón cerebral revela no solo atención, sino también una evaluación emocional favorable.

Desde una perspectiva neuroeducativa, estos resultados cuestionan la suposición frecuente de que los contenidos abstractos tienden a distanciar emocionalmente al estudiante. Por el contrario, confirman que una presentación clara, bien organizada y articulada puede estimular positivamente la corteza prefrontal izquierda, favoreciendo tanto el interés como una regulación emocional adecuada frente a desafíos cognitivos (Immordino-Yang & Damasio, 2007; Tokuhama-Espinosa, 2011).

5.3.6 Análisis de C3 Gamma Z-Score (Gráfica de Violín)



Tal como explicábamos en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana indica básicamente el valor central de la distribución, mientras que el rango intercuartílico (IQR) delimita esa zona en la que suele concentrarse la mayoría de los valores.

Para esta característica, la mediana del nuevo segmento EEG (-0.876) está por debajo de la mediana de la clase "atracción" obtenida en la fase de entrenamiento (-0.631), pero claramente alejada de la mediana asociada al rechazo (-0.390). Esta diferencia sugiere una activación que refuerza el patrón aprendido como algo emocionalmente positivo.

Por otro lado, el IQR del nuevo segmento EEG [-0.967, -0.785] queda por completo dentro del rango típico de la atracción (aproximadamente entre [-0.775, -0.550]) y no se solapa en absoluto con la zona central de los valores para el rechazo ([-0.797, 0.886]). La verdad es que esta coincidencia estructural fortalece la idea de que la respuesta registrada es coherente con un estado emocional positivo, de atracción.

En cuanto a la desviación estándar, que es de 0.365, indica una ligera variabilidad, aunque la señal sigue siendo relativamente estable y sin valores extremos o inesperados. Además, la forma

simétrica y densa del gráfico en violín, sin colas muy pronunciadas, refuerza esta interpretación de estabilidad emocional continua.

En definitiva, esta activación señala una implicación sensoriomotora evidente y constante. Aunque sea una explicación más bien abstracta y teórica, el patrón registrado coincide muy claramente con las señales previas que asociábamos a estímulos agradables y emocionalmente positivos. Por ello, el modelo interpreta esta señal como "atracción" con bastante seguridad.

Significado neurofuncional y educativo

El electrodo C3 está ubicado sobre la corteza sensoriomotora izquierda, implicando principalmente las áreas de Brodmann 1, 2 y 3 (que son las somatosensoriales primarias), además del área 4 (motora primaria). Estas áreas no solo se activan cuando hacemos movimientos reales, sino también cuando simplemente imaginamos una acción mentalmente: por ejemplo, dibujar una línea, visualizar una figura o recorrer una secuencia mentalmente (Fries, 2015; Tallon-Baudry, 2009).

Estudios más recientes (como el de Cottone et al., 2016) han relacionado la actividad gamma en esta región con procesos internos de visualización corporal o planificación motora que no llegan a concretarse físicamente. En nuestro caso, la activación registrada en C3 sugiere que el estudiante no solo ha captado el contenido intelectualmente, sino que también lo interiorizó mediante representaciones corporales internas: quizá imaginándose la forma del número π o recorriendo mentalmente algún recorrido visual específico.

Desde la mirada neuroeducativa, esta activación implica una comprensión bastante profunda, porque no se queda solo en un procesamiento intelectual o racional, sino que involucra al cuerpo como base del pensamiento. Como bien han señalado Immordino-Yang y Damasio (2007), así como Tokuhama-Espinosa (2011), el aprendizaje realmente significativo ocurre cuando hay una integración natural entre la emoción, el cuerpo y el razonamiento lógico. En nuestro caso, es probable que la claridad estructural de esta explicación abstracta facilitara esta integración, demostrando que incluso contenidos no visuales pueden activar circuitos motivacionales y generar un compromiso cognitivo intenso, siempre que se presenten con la lógica, claridad y el ritmo adecuado.

5.3.7 Conclusión Final e Implicaciones Pedagógicas

El análisis conjunto de las señales EEG más representativas nos muestra que la explicación abstracta del número π generó en el cerebro del estudiante una respuesta mayoritariamente relacionada con un estado de "atracción", con un nivel medio de confianza alrededor de 0.57. Esta cifra, aunque moderada, se ve reforzada por diversos indicadores fisiológicos positivos.

En concreto, en la región parietal (electrodo Pz), que se relaciona directamente con el área de Brodmann 7, se detectó una activación gamma intensa y bastante estable. Esta zona del cerebro se encarga fundamentalmente de la integración visoespacial y la atención dirigida, lo que indica

que el estudiante procesó el contenido de manera atenta y sostenida, aunque no contara con ningún apoyo visual dinámico (Rosanova et al., 2009).

En la zona sensoriomotora izquierda (C3, BA4), la señal recogida coincidió claramente con procesos internos de simulación del movimiento. Lo cierto es que esto significa que el estudiante no solo comprendía la explicación de forma abstracta, sino que también la estaba "manipulando mentalmente", quizás imaginando trayectorias o formas relacionadas con el círculo o el número π (Cottone et al., 2016).

Además, en la zona prefrontal izquierda (Fp1, BA10), que se encarga principalmente de la regulación emocional y el control ejecutivo, también se observó una activación bastante homogénea, típica de estados emocionales positivos y sin ruido afectivo. Este patrón sugiere claramente que existía un compromiso emocional estable y una disposición atencional favorable hacia el contenido presentado (Harmon-Jones, 2004).

La única excepción se encontró en la región central (Cz), donde la señal resultó algo ambigua. Probablemente, esto tenga que ver con la ausencia de estímulos sensoriales directos o con la complejidad cognitiva propia de explicaciones tan teóricas (Cho et al., 2006). Sin embargo, incluso en este caso, la señal no mostró ningún indicio claro de rechazo.

Desde una perspectiva educativa, estos resultados validan la eficacia de las explicaciones abstractas, siempre que sean claras y bien estructuradas. Aunque en esta ocasión no se emplearon recursos visuales extra, el contenido logró generar respuestas emocionales positivas. A futuro, es probable que el uso estratégico de apoyos visuales, pausas cognitivas bien ubicadas o dinámicas corporales breves puedan potenciar aún más la implicación atencional y emocional de los estudiantes (Tokuhama-Espinosa, 2011; Immordino-Yang & Damasio, 2007).

5.4 Resultados de la condición: Lengua – Explicación concreta

Contexto del análisis

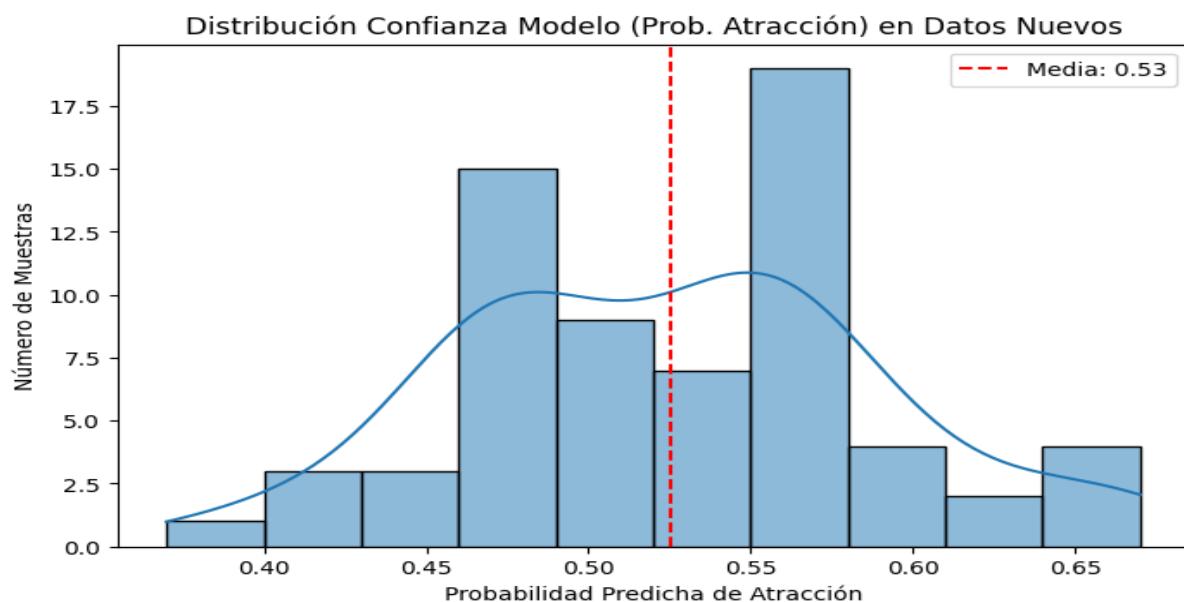
En este apartado se examina cómo reacciona el modelo de clasificación entrenado exclusivamente con señales EEG registradas durante la exposición a estímulos visuales con carga emocional positiva o negativa frente a un nuevo conjunto de datos que, en este caso, provienen de una explicación concreta de contenidos lingüísticos.

El modelo fue desarrollado a partir de las señales cerebrales recogidas en los tres participantes del estudio (identificados como uno, dos y tres), y se entrenó únicamente con estímulos visuales previamente etiquetados como “atracción” o “rechazo”. Es importante destacar que, hasta este punto, no había sido expuesto a datos de tipo educativo, lo que convierte este análisis en una verdadera prueba de generalización, al aplicarse sobre un contenido completamente distinto: narrativo y de carácter académico.

Los datos analizados aquí corresponden únicamente al participante uno (quien además es el autor de este trabajo), y fueron obtenidos durante el visionado de una explicación grabada en vídeo sobre la historia y evolución de los sustantivos. Dicha exposición fue diseñada con un estilo cercano y expresivo, utilizando un lenguaje claro y accesible, un tono oral natural y algunos gestos de apoyo, aunque sin emplear recursos visuales externos como imágenes o presentaciones.

El propósito de este análisis es explorar si un modelo entrenado con reacciones afectivas ante estímulos visuales es capaz de identificar patrones comparables de atracción o rechazo en una situación de aprendizaje lingüístico, y con qué nivel de confianza lo hace. Esto nos permite evaluar, en última instancia, si existe una cierta transferencia emocional entre tipos de estímulo muy distintos, y detectar qué dinámicas cerebrales se activan ante explicaciones escolares con un componente narrativo bien estructurado.

5.4.1 Distribución de Confianza del Modelo (Histograma y Curva KDE)



Estadísticas de la probabilidad de atracción:

- Media: 0.525
- Mediana: 0.530
- Mínimo: 0.370
- Máximo: 0.670

- Desviación estándar: 0.066

Descripción general

El análisis de las probabilidades predichas por el modelo Random Forest, aplicado a la explicación concreta de lengua (centrada en la evolución histórica de los sustantivos), revela una media de 0.525 y una mediana prácticamente idéntica de 0.530. Esta coincidencia sugiere que la distribución de los datos es bastante simétrica, aunque se detecta una ligera inclinación hacia valores más bajos, tal como lo refleja la asimetría negativa observada en la curva KDE.

Los valores fluctúan entre 0.370 y 0.670, pero se concentran especialmente en el rango entre 0.48 y 0.58. Además, aparecen varios segmentos con puntuaciones elevadas (por encima de 0.60), lo que indica que durante la explicación hubo momentos puntuales con una carga emocional más intensa.

La desviación estándar, que se sitúa en 0.066, es relativamente baja. Esto implica que la señal EEG se mantuvo estable, sin grandes variaciones afectivas, lo cual es coherente con un estado emocional sostenido a lo largo del tiempo, sin interrupciones abruptas.

Interpretación general

Con una media en torno a 0.53, el modelo interpreta esta explicación como moderadamente atractiva, posicionándose apenas por encima del umbral neutro de 0.50. No hablamos de una atracción intensa, pero sí de una respuesta emocional constante, sin signos claros de rechazo ni ambivalencia.

Este patrón parece reflejar que el formato narrativo elegido, con una estructura cronológica y un estilo oral expresivo, fue efectivo para mantener el interés afectivo del estudiante. Es decir, generó una activación emocional suave, pero sostenida, en redes cerebrales vinculadas a la comprensión del lenguaje.

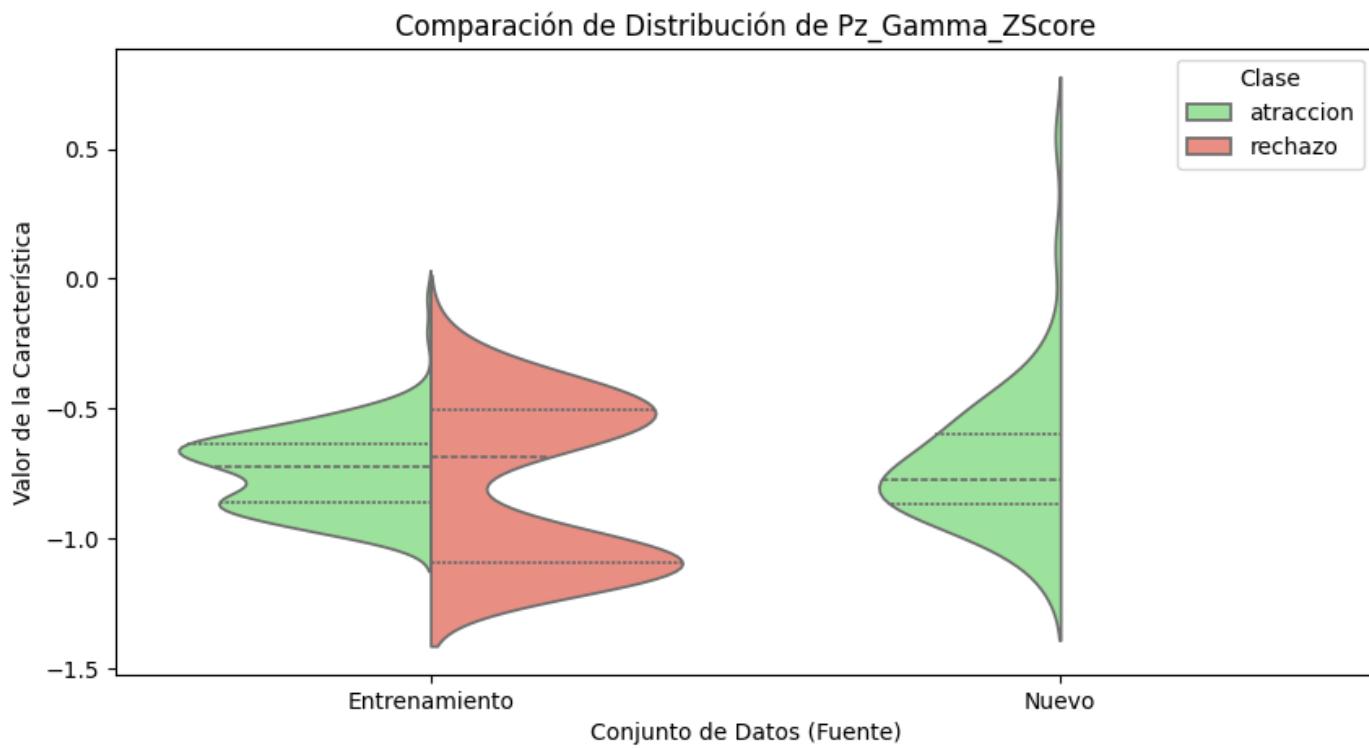
Desde una mirada neuroeducativa, esta distribución sugiere que las explicaciones de contenido lingüístico, cuando se estructuran de manera narrativa y se presentan con tono expresivo, pueden lograr una implicación emocional positiva y duradera. Aunque no provocan un entusiasmo muy elevado, sí logran mantener al estudiante en un estado receptivo, que favorece el aprendizaje.

Este hallazgo coincide con estudios sobre la función del lóbulo temporal izquierdo (particularmente la zona T7), el cual está implicado en la integración de lenguaje, emoción y memoria

episódica (Davidson, 2004; Olson et al., 2007). La estabilidad observada en la señal EEG también encaja con investigaciones que vinculan la actividad gamma sostenida con atención mantenida y procesamiento afectivo coherente (Fries, 2015; Cho et al., 2006).

Para fortalecer aún más esta valencia emocional positiva, sería recomendable destacar ciertos momentos clave del relato mediante pausas dramáticas, variaciones expresivas en la voz o incluso gestos simbólicos. Estas estrategias pueden intensificar los picos de atracción, facilitando una codificación emocional más profunda del contenido (Immordino-Yang & Damasio, 2007; Tokuhama-Espinosa, 2011).

5.4.2 Análisis de la característica Pz_Gamma_ZScore – Lengua Concreto



Tal como se detalló en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana representa el valor central de una distribución, mientras que el rango intercuartílico (IQR) señala la franja en la que se concentra la mayoría de las respuestas cerebrales.

En este caso particular, la mediana del nuevo segmento EEG (-0.773) se sitúa un poco por debajo de la mediana registrada en los segmentos previamente clasificados como “atracción” (-0.725) y claramente más alejada de la correspondiente a la clase “rechazo” (-0.687). Esta

cercanía con la clase atractiva refuerza la hipótesis de que se trata de una activación compatible con estados emocionales positivos.

Por su parte, el IQR de este nuevo segmento $[-0.843, -0.572]$ coincide en gran medida con el rango intercuartílico de la clase atracción (aproximadamente $[-0.840, -0.610]$), sin mostrar solapamientos con el rango característico del rechazo. Esta coincidencia en la estructura estadística sugiere que la señal EEG registrada comparte patrones similares a los que el modelo ya ha aprendido a identificar como placenteros o emocionalmente atractivos.

La desviación estándar, de 0.268, es algo mayor que la observada en la clase de atracción durante la fase de entrenamiento (0.151), pero aún se mantiene en un rango moderado. Esta mayor variabilidad podría deberse a fluctuaciones naturales en la narración oral: cambios de tono, pausas expresivas o variaciones en el énfasis, que suelen ser propios de un discurso más dinámico y vivencial.

En conjunto, este indicador revela que la región parietal media presentó una activación gamma coherente con un estado atencional positivo. A pesar de las pequeñas oscilaciones, la señal se mantuvo dentro de los márgenes que el modelo interpreta como signos de atracción, lo cual permite una clasificación con un grado alto de confianza.

Significado neuroeducativo y funcional

Desde la perspectiva de la neurociencia educativa, la actividad gamma registrada en el electrodo Pz, ubicado sobre la corteza parietal media—, se asocia con funciones como la integración visoespacial, la atención sostenida y el procesamiento multisensorial. Esta región se corresponde con el área de Brodmann 7, clave en la convergencia de estímulos visuales, lingüísticos y espaciales.

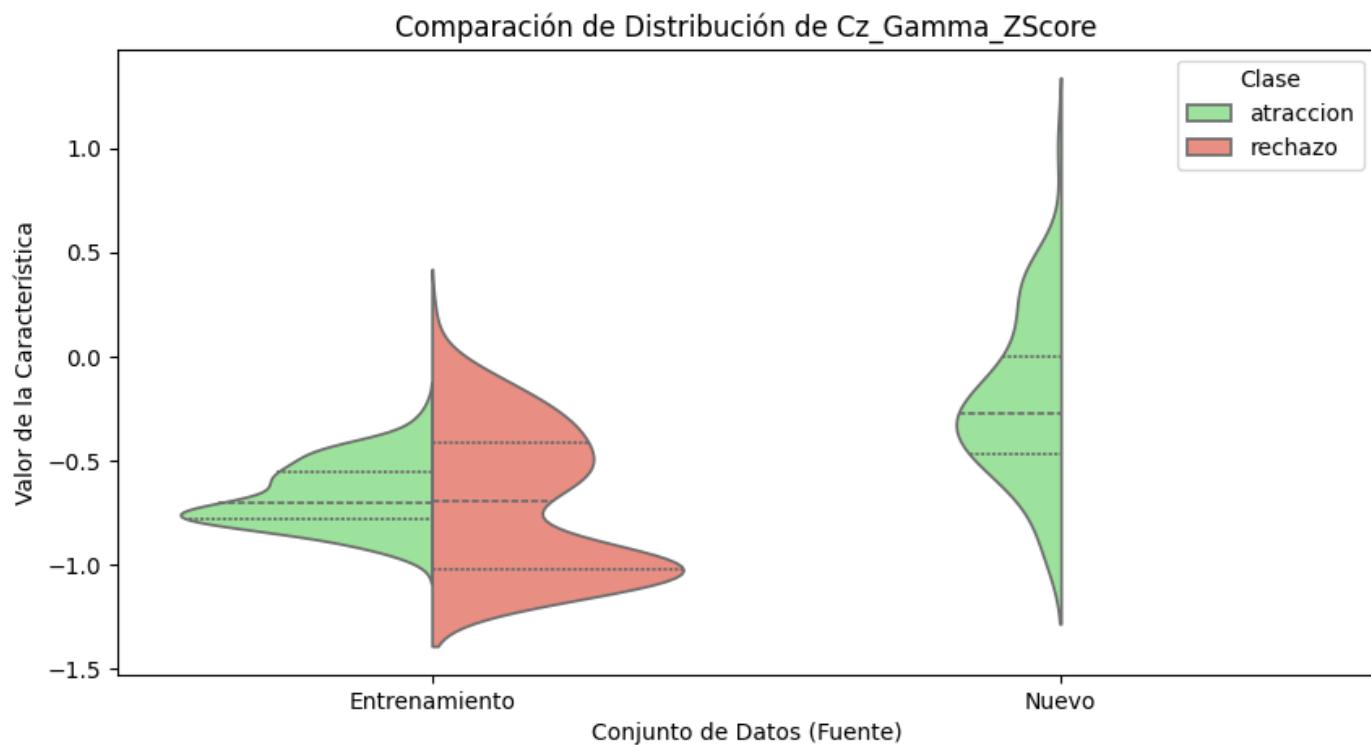
En este contexto, la activación de Pz durante la explicación sugiere que el estudiante no solo estaba prestando atención, sino también integrando visual y lingüísticamente la información que recibía. Esta hipótesis se alinea con investigaciones recientes sobre el *binding* perceptivo, que señalan cómo la narración acompañada de gestos o referencias visuales favorece una codificación semántica más profunda del lenguaje (Cedeño, Méndez & Salazar, 2024).

Aunque la desviación estándar fue algo más alta, lo cual puede reflejar los matices expresivos del narrador, como variaciones de voz o cambios de ritmo, la activación se mantuvo en un rango emocionalmente positivo. Esto indica una atención comprometida, sintonizada afectivamente con el discurso.

Desde el plano pedagógico, esto refuerza la idea de que recursos como relatos personificados, metáforas visuales o el uso del lenguaje corporal no solo enriquecen la comprensión, sino que también potencian el impacto emocional, incluso en explicaciones de corte más abstracto. La señal gamma registrada en Pz confirma que la experiencia fue significativamente atractiva y que, a pesar de la complejidad del contenido, el canal narrativo logró sostener la implicación

emocional del estudiante. Como sugerencia final, podría ser útil suavizar las transiciones de tono para favorecer una mayor coherencia afectiva a lo largo del discurso.

5.4.3 Análisis de la característica Cz_Gamma_ZScore – Lengua Concreto



Tal como se menciona en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana refleja el valor central de una distribución, mientras que el rango intercuartílico (IQR) indica la franja en la que se agrupan la mayoría de las respuestas cerebrales.

En este caso particular, la mediana del nuevo segmento EEG registrado en Cz (-0.270) se aleja bastante del patrón de atracción observado durante el entrenamiento (-0.702), situándose en una zona mucho más neutra y ambigua desde el punto de vista afectivo. Aunque no se acerca a los valores típicos de rechazo (-0.690), tampoco conserva la sintonía con un perfil claramente atractivo.

El IQR del segmento analizado $[-0.504, -0.036]$ presenta solo una coincidencia parcial con el rango de atracción ($[-0.786, -0.557]$), y al mismo tiempo se solapa significativamente con el rango característico del rechazo. Esto sugiere un patrón bastante difuso, poco definido, que el modelo no logra clasificar con claridad. En otras palabras, la señal no termina de alinearse con ninguno de los extremos emocionales aprendidos.

La desviación estándar, de 0.385, triplica aproximadamente la observada durante el entrenamiento en la clase de atracción (0.152). Esta elevada variabilidad podría estar reflejando oscilaciones cognitivas a lo largo de la explicación: momentos de mayor implicación emocional seguidos por tramos más distantes o abstractos, probablemente ligados al tipo de contenido lingüístico o a ciertas características del estilo narrativo.

En conjunto, lo que muestra esta característica es una señal EEG ambivalente, sin marcadores claros ni hacia la atracción ni hacia el rechazo. El modelo, por tanto, encuentra dificultades para clasificarla con certeza, lo que sugiere que estamos ante una región más centrada en lo funcional que en lo emocional, muy influida por las fluctuaciones internas del procesamiento cognitivo del estudiante.

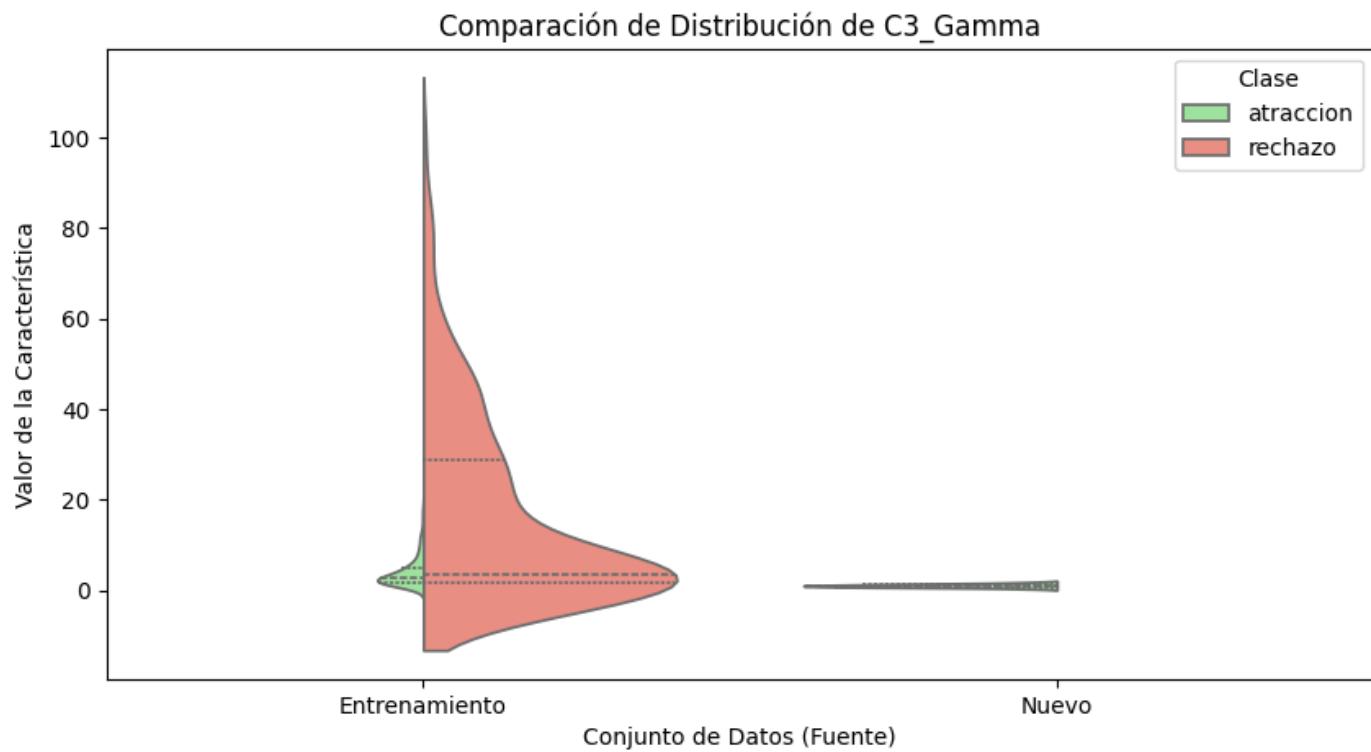
Significado neurofuncional y educativo

Desde una perspectiva neurofuncional, el electrodo Cz se encuentra en la corteza sensoriomotora medial y participa en funciones clave como la coordinación sensorial, la integración motora y, sobre todo, el control atencional sostenido y la gestión de la carga cognitiva. Esta región suele activarse especialmente en tareas que requieren esfuerzo mental continuo, como la comprensión de estructuras sintácticas complejas o la planificación verbal (Clos et al., 2013; Sweller, 1998).

La alta variabilidad gamma registrada en Cz sugiere que, durante la explicación, el estudiante atravesó transiciones cognitivas intensas, alternando entre momentos de atención activa y otros en los que pudo haber cierta sobrecarga mental. No se observa un rechazo emocional, pero sí señales de un procesamiento más fragmentado, quizás provocado por la densidad del contenido o su nivel de abstracción.

Desde el enfoque neuroeducativo, este patrón pone de manifiesto que el diseño narrativo podría beneficiarse de algunos ajustes didácticos. Sería recomendable incorporar pequeñas pausas de reflexión, apoyos visuales complementarios o ejemplos concretos que ayuden al sistema sensorial del estudiante a reorganizar y consolidar la información sin saturarlo. De este modo, se favorece un proceso de integración emocional y cognitiva más estable, algo especialmente importante cuando se trabaja con contenidos abstractos o de alta complejidad.

5.4.4 Análisis de C3 Gamma – Lengua Concreto



Tal como se explicó en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana representa el valor central de la distribución, mientras que el rango intercuartílico (IQR) señala el intervalo donde tienden a concentrarse la mayoría de los datos registrados.

En esta ocasión, la mediana del nuevo segmento EEG (1.034) se encuentra por debajo del valor medio observado en la clase “atracción” durante el entrenamiento (2.846). Aun así, se mantiene a una distancia considerablemente menor de esa clase que del patrón de rechazo (3.474). Esta posición intermedia parece indicar una activación emocional positiva, aunque de menor intensidad.

El IQR del nuevo segmento [0.777, 1.292] muestra un rango compacto, sin solaparse con los valores propios del rechazo, lo que sugiere una cierta estabilidad emocional y una afinidad estructural con experiencias que el modelo ha interpretado antes como atractivas. Esta lectura se refuerza al observar la baja desviación estándar (0.324), que indica que no hubo grandes altibajos emocionales a lo largo del discurso.

El gráfico de violín, además, presenta una forma simétrica y compacta, sin colas ni picos llamativos. Esto nos habla de una respuesta cerebral sostenida y coherente. Si bien la activación no llega a los niveles más altos observados en estímulos particularmente atractivos durante el entrenamiento, sí aporta a una interpretación general positiva, emocionalmente favorable.

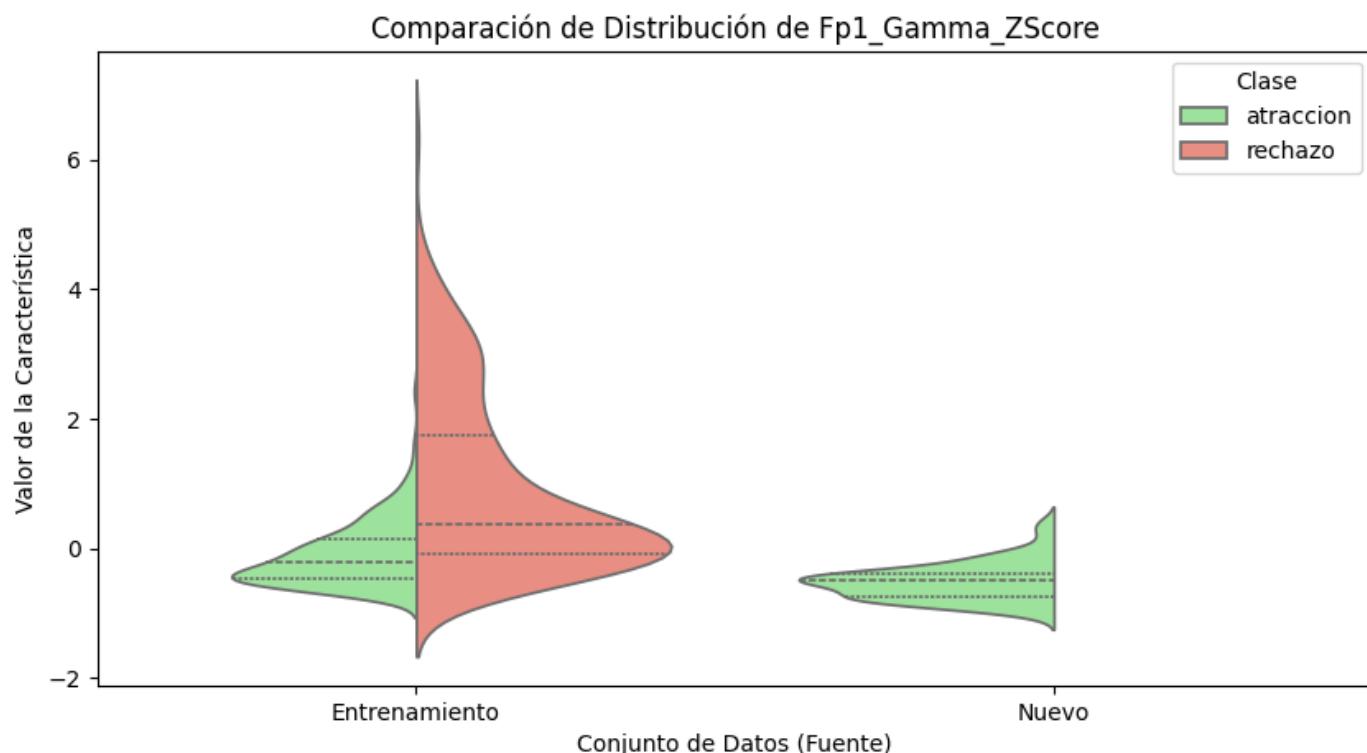
Significado neurofuncional y educativo

Desde el punto de vista de la neurociencia funcional, el electrodo C3 se localiza sobre la corteza sensoriomotora izquierda, y se asocia principalmente con el área de Brodmann 4. Esta región se activa durante la planificación y ejecución de movimientos, pero también, y esto es clave, durante la observación o imaginación de gestos, en lo que se conoce como simulación motora interna (Clos et al., 2013; Ardila et al., 2016).

En este caso, la actividad gamma, aunque leve, fue constante, lo que sugiere que el estudiante no necesitó realizar movimientos visibles para que su cerebro generara una respuesta corporal interna. Esta señal apunta a un nivel de comprensión activa, en el que el cuerpo, de forma implícita, participa en la asimilación del contenido. Es lo que conocemos como aprendizaje corporeizado (*embodied cognition*), donde el pensamiento se apoya en el cuerpo y la acción imaginada (Immordino-Yang & Damasio, 2007).

Desde una mirada educativa, esta activación indica que la explicación fue recibida como clara, estable y mentalmente estimulante, permitiendo al estudiante “ensayar” internamente las ideas. Para reforzar este tipo de procesamiento, puede ser muy útil introducir pequeñas dinámicas de dramatización, gestos simbólicos o incluso representaciones corporales, especialmente cuando se trabaja con contenidos abstractos. Esto favorece una implicación sensoriomotora más rica y emocionalmente conectada con lo que se quiere aprender.

5.4.5 Análisis de Fp1 Gamma Z-Score – Lengua Concreto



Tal como se explicó en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana representa el valor central de la distribución, mientras que el rango intercuartílico (IQR) nos indica el intervalo donde tienden a agruparse la mayoría de las respuestas.

En este caso, la mediana del nuevo segmento EEG (-0.494) es claramente más negativa que la registrada en los segmentos clasificados como “atracción” durante el entrenamiento (-0.207). Esta diferencia de 0.287 unidades Z refuerza con bastante solidez la hipótesis de que la respuesta cerebral se alineó de forma clara con un patrón emocional positivo previamente aprendido por el modelo.

El IQR del nuevo segmento $[-0.673, -0.315]$ se encuentra por completo dentro del intervalo característico de la clase “atracción”, sin mostrar ningún solapamiento con el rango típico del rechazo. Esta ausencia de cruce entre ambos rangos sugiere que se trata de una activación afectiva limpia, sin señales de ambivalencia ni de duda emocional.

La dispersión de los datos, medida a través de una desviación estándar de 0.283 , es baja. Esto indica que la respuesta del estudiante se mantuvo bastante homogénea a lo largo de la explicación. A nivel visual, el gráfico de violín apoya esta lectura: muestra una forma simétrica, sin colas alargadas ni valores extremos. Todo apunta a una estabilidad emocional mantenida.

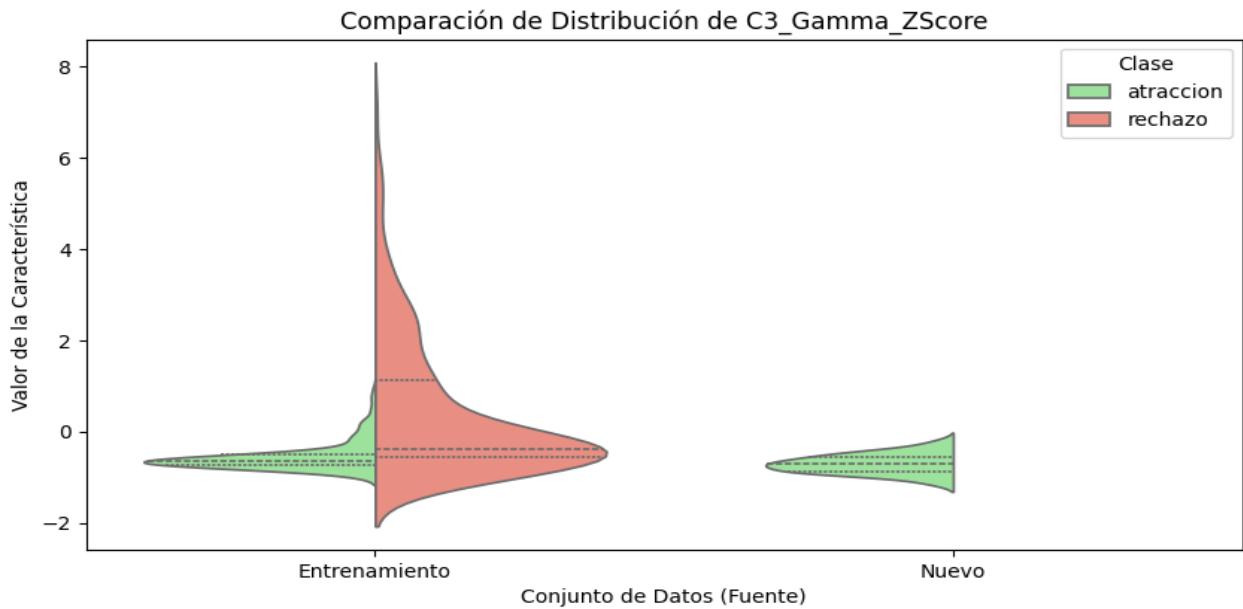
En conjunto, esta característica revela que la activación en la región frontal izquierda fue constante, intensa y orientada hacia la atracción. Es razonable pensar que el modelo de clasificación le da un peso importante a esta región cuando necesita distinguir entre estados emocionales opuestos, especialmente por la coincidencia tan clara con los patrones observados durante el entrenamiento.

Significado neurofuncional y educativo

Desde la perspectiva de la neuroeducación, este patrón sugiere que la explicación logró activar de forma eficaz la corteza prefrontal izquierda. Es probable que el uso combinado de humor, ritmo narrativo fluido y variaciones vocales haya sido clave en este proceso. Estas estrategias no solo captan y sostienen la atención, sino que, como indican algunos estudios sobre la relación entre actividad gamma y *engagement* emocional (Fries, 2015), también favorecen una mejor codificación de la información.

En términos pedagógicos, mantener un tono dinámico, incorporar preguntas retóricas o introducir pequeños cambios expresivos en la voz puede reforzar aún más esta vía prefrontal, optimizando la implicación emocional y cognitiva del estudiante en momentos clave del discurso.

5.4.6 Análisis de C3 Gamma Z-Score – Lengua Concreto



Tal como se explica en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana representa el valor central de la distribución, mientras que el rango intercuartílico (IQR) señala el intervalo en el que se concentra la mayor parte de las respuestas.

En este caso, la mediana del nuevo segmento EEG (-0.715) es más negativa que la mediana observada en los segmentos clasificados como “atracción” durante el entrenamiento (-0.631), y se encuentra aún más alejada del valor típico asociado al rechazo (-0.390). Esta diferencia sugiere una activación cerebral cercana a los patrones agradables que el modelo ha aprendido a reconocer.

La franja intercuartílica del nuevo segmento ($[-0.881, -0.549]$) se encuentra completamente contenida dentro del rango típico de la clase “atracción”, sin solaparse en ningún punto con los valores propios del rechazo. Esta coincidencia estructural refuerza la interpretación de que la señal EEG en esta zona refleja un estado afectivo claramente positivo.

La dispersión de los datos, representada por una desviación estándar de 0.208, es baja e incluso menor que la registrada durante el entrenamiento, lo que indica una respuesta emocional estable y homogénea a lo largo de toda la explicación. A nivel visual, el gráfico de violín presenta un perfil estrecho, simétrico y sin colas pronunciadas, lo que sugiere una activación constante, sin grandes oscilaciones.

Todo esto apunta a que la región sensoriomotora izquierda (C3) respondió con notable coherencia ante la explicación lingüística. Dado que este electrodo suele reflejar procesos vinculados

a la simulación interna de gestos o acciones, es razonable pensar que el estudiante generó representaciones motoras mentales mientras seguía la narrativa. Este tipo de respuesta favorece un aprendizaje más profundo y significativo, al vincular cuerpo y lenguaje.

Significado neurofuncional y educativo

La actividad gamma en C3 está asociada a mecanismos de integración sensorial y simulación motora, elementos clave en la comprensión de acciones y objetos manipulables (Frey, 2008). En un contexto de enseñanza gramatical, esta activación sugiere que el estudiante no se limitó a escuchar, sino que posiblemente “recreó” internamente los movimientos o situaciones descritas por el docente.

Desde el enfoque de la neuroeducación, este tipo de aprendizaje, en el que el cuerpo participa mentalmente en el proceso, se denomina aprendizaje encarnado (*embodied learning*). Para potenciar este canal motor-lingüístico, resulta útil incorporar tareas como dramatizaciones breves, mimética gramatical o incluso ejercicios de escritura en el aire. Estas actividades no solo activan la memoria corporal, sino que también ayudan a consolidar los conceptos de forma más viva, integrada y emocionalmente conectada.

5.4.7 Conclusión Final e Implicaciones Pedagógicas – Lengua Concreto

El análisis conjunto de las señales cerebrales más representativas indica que, durante la expli-cación narrativa y expresiva sobre los sustantivos, se produjo una activación mayoritariamente asociada a la atracción, aunque de intensidad moderada.

En la región parietal media (electrodo Pz, área de Brodmann 7), las bandas gamma muestran una mediana de -0.773 Z, situada claramente dentro del rango que el modelo interpreta como emocionalmente positivo. Esta señal sugiere que el estudiante logró integrar eficazmente la información visual y espacial, probablemente gracias a recursos como el uso de metáforas es-cénicas, lenguaje corporal y una narrativa bien estructurada. Según lo descrito por Rosanova et al. (2009), este tipo de activación está vinculado con procesos de atención visual y construcción de significado.

En el plano sensoriomotor izquierdo (electrodo C3, áreas de Brodmann 1, 2, 3 y 4), tanto el valor absoluto de la señal (1.034) como su equivalente en Z-score (-0.715 Z) indican una activación leve pero sostenida. Esto apunta a que el estudiante “reprodujo” internamente algunos de los gestos o acciones narradas, como si su cuerpo, en silencio, acompañara el relato. Este

patrón es característico del llamado *embodied learning*, o aprendizaje corporizado, ampliamente documentado por autores como Rizzolatti y Sinigaglia (2010), y Gallese y Lakoff (2005).

En términos emocionales y atencionales, la región prefrontal izquierda (electrodo Fp1, área de Brodmann 10) mostró una señal centrada en la zona de atracción (mediana de -0.494 Z), con muy poca variabilidad. Este patrón se asocia con regulación emocional positiva y atención sostenida, lo que indica que el discurso fue recibido como agradable y emocionalmente coherente (Harmon-Jones, Gable, & Peterson, 2010).

Por otro lado, en la zona central del cerebro (electrodo Cz, área de Brodmann 6), la activación fue más ambigua (mediana de -0.270 Z) y con mayor variabilidad. Este tipo de señal suele relacionarse con momentos de alta carga mental, y en este caso podría deberse a la densidad de algunos tramos del contenido gramatical (Sweller, 1998; Cho et al., 2006).

En su conjunto, el modelo clasificó la experiencia con una probabilidad media de atracción del 52.5 %. Si bien no se trata de una respuesta emocional intensa, sí refleja una implicación sostenida y sin señales de rechazo.

- Desde la mirada pedagógica, estos resultados refuerzan la idea de que una explicación narrativa, expresiva y apoyada en recursos orales y gestuales puede generar una experiencia emocional positiva, incluso en temáticas lingüísticas complejas. Para intensificar este efecto, se sugiere:
- Utilizar tarjetas visuales o ilustraciones sencillas para reforzar la atención visual (Pz);
- Incorporar pequeñas dinámicas corporales como la dramatización o la escritura en el aire, para activar la vía sensoriomotora (C3);
- Introducir pausas reflexivas y metáforas accesibles que ayuden a digerir los conceptos más densos sin generar sobrecarga (Cz).

Estas estrategias se alinean con los principios de la neuroeducación integradora, que propone un aprendizaje profundo a través del compromiso multisensorial y emocional del estudiante (Tokuhama-Espinosa, 2011; Immordino-Yang & Damasio, 2007).

5.5 Resultados de la condición: Lengua – Explicación abstracta

Contexto del análisis

En este análisis se estudia cómo responde el modelo de clasificación Random Forest al aplicarse a un nuevo conjunto de datos EEG, registrados mientras el estudiante visualizaba una explicación abstracta sobre los sustantivos. Esta condición se diseñó de forma intencionadamente más

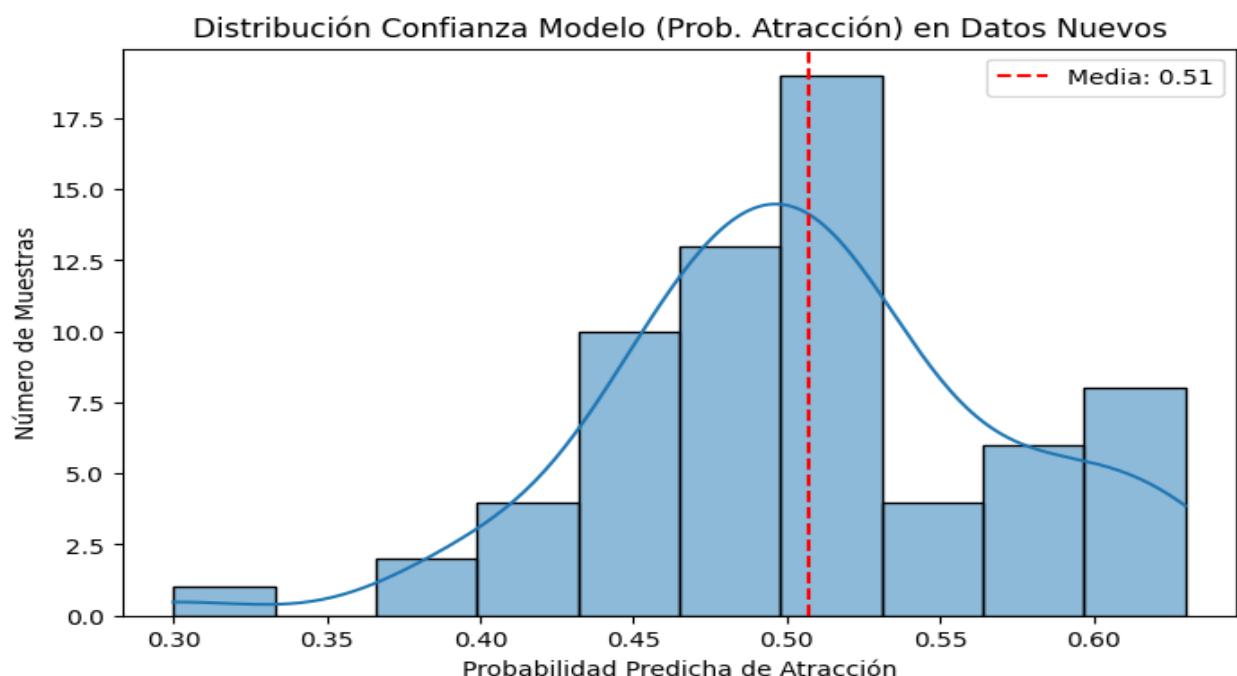
técnica y conceptual, sin apoyos visuales llamativos ni gestos o teatralización. El estilo se centró en el uso preciso del lenguaje, con definiciones académicas claras y una estructura lógica bien definida.

El modelo utilizado fue entrenado previamente con datos EEG de tres participantes (identificados como uno, dos y tres), recogidos mientras observaban estímulos visuales con carga emocional positiva o negativa. Cada segmento fue etiquetado como “atracción” o “rechazo” según la respuesta afectiva percibida, lo que permitió al modelo aprender los patrones neuronales típicos de cada estado emocional.

Aplicar este modelo a los nuevos datos, en este caso, del participante uno, quien además es el autor del presente trabajo, permite explorar cómo reacciona el cerebro ante una explicación puramente lingüística, sin estímulos sensoriales adicionales ni refuerzos emocionales explícitos. El objetivo es determinar si este tipo de discurso logra generar una respuesta neuronal similar a la atracción o si, por el contrario, se sitúa más cerca de una activación neutra o incluso de rechazo.

Este tipo de análisis aporta información valiosa sobre el impacto afectivo y atencional que pueden tener los contenidos académicos abstractos en un contexto educativo real. Y lo más importante: ofrece una base neuroeducativa útil para repensar estrategias didácticas que busquen no solo enseñar, sino también conectar emocionalmente con el alumnado.

5.5.1 Distribución de Confianza del Modelo (Histograma y Curva KDE)



Estadísticas de la probabilidad de atracción

- **Media:** 0.507
- **Mediana:** 0.510
- **Mínimo:** 0.300
- **Máximo:** 0.630
- **Desviación** **estándar:** 0.065

Descripción general

El análisis de las probabilidades predichas por el modelo Random Forest, aplicadas a la explicación abstracta sobre los sustantivos, una presentación teórica, lineal y sin apoyo visual ni gestual— muestra una media y una mediana de 0.51. Esta coincidencia sugiere una distribución bastante simétrica, sin inclinaciones claras hacia estados emocionales extremos, ya sea de atracción o de rechazo.

La mayor concentración de valores se sitúa entre 0.45 y 0.52, lo que apunta a una tendencia afectiva cercana a la neutralidad. Aunque se registró un valor mínimo de 0.30, este no indica un rechazo rotundo, sino más bien momentos con un impacto emocional bajo. En el otro extremo, el valor máximo (0.63) sugiere que algunos fragmentos del discurso lograron activar positivamente el sistema emocional, aunque de forma puntual.

La desviación estándar, que fue de 0.065, refleja una variabilidad bastante baja. Esto implica que el patrón emocional se mantuvo constante a lo largo de toda la explicación, sin grandes altibajos ni cambios de tono evidentes. Esta estabilidad, sin embargo, también puede interpretarse como una carencia de momentos emocionalmente destacados.

Interpretación general

Con una media de 0.507, el modelo indica que esta explicación abstracta no provocó rechazo, pero tampoco consiguió consolidarse como especialmente atractiva. La mayoría de los fragmentos fueron clasificados como cercanos al punto de equilibrio emocional (0.50), con una leve inclinación hacia la atracción. En comparación con otras condiciones analizadas, esta fue la más neutral de todas.

El hecho de que algunos fragmentos alcanzaran puntuaciones más altas sugiere que ciertos elementos del discurso como ejemplos puntuales, metáforas conceptuales o modulaciones espontáneas en la voz, lograron, en momentos concretos, activar redes afectivas más positivas. Sin

embargo, estos destellos emocionales no fueron lo bastante frecuentes como para cambiar el tono general de la experiencia.

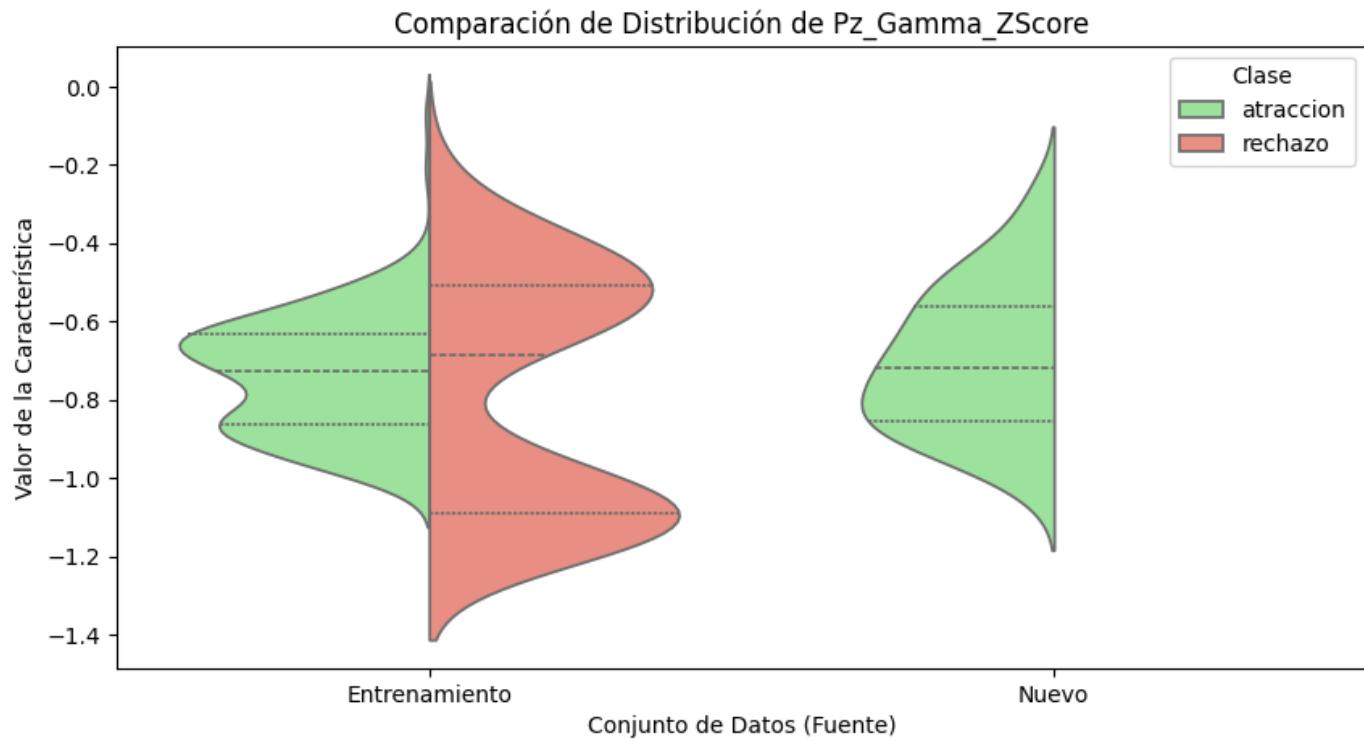
Implicaciones pedagógicas

Desde una mirada neuroeducativa, este patrón refuerza la idea de que las explicaciones abstractas, cuando se presentan sin apoyo visual, sin expresividad vocal ni componentes emocionales, tienden a generar respuestas cerebrales planas en el plano afectivo. No hay rechazo, pero tampoco se activa con fuerza el sistema de aproximación emocional, clave para la motivación, el interés y el recuerdo.

Como han planteado Immordino-Yang y Damasio (2007), aprender de forma profunda no depende solo de la lógica o la claridad conceptual, sino también de la capacidad de generar una conexión emocional con el contenido. En este caso, la explicación abstracta podría ganar fuerza si se complementa con recursos pedagógicos como ilustraciones sencillas, dinámicas visuales breves, pausas de reflexión o ejemplos que conecten lo teórico con lo cotidiano.

En resumen, no se trata de una condición fallida, sino de una propuesta que, desde el punto de vista emocional, quedó a medio camino. La estabilidad afectiva observada puede ser un buen punto de partida, pero para que el aprendizaje sea realmente significativo y multisensorial, es necesario activar de forma intencionada los sistemas emocionales a través del diseño didáctico.

5.5.2 Análisis de Pz Gamma Z-Score – Lengua Abstracto



Tal como se señala en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana representa el valor central de una distribución, mientras que el rango intercuartílico (IQR) nos muestra el intervalo donde se concentran la mayoría de las respuestas.

En esta característica concreta, la mediana del nuevo segmento EEG (-0.719) coincide casi de forma exacta con la mediana obtenida en los segmentos clasificados como “atracción” durante el entrenamiento (-0.725), con una diferencia mínima de apenas $+0.006$ unidades Z. Esta cercanía tan precisa sugiere una notable similitud entre ambas condiciones, reflejando una respuesta emocional positiva clara y estable.

Además, el rango intercuartílico del nuevo segmento $[-0.866, -0.573]$ se encuentra completamente contenido dentro del IQR de la clase “atracción” y no presenta ningún solapamiento con el de la clase “rechazo”. Este alineamiento perfecto refuerza la idea de que la activación cerebral en esta región, durante la explicación, fue coherente con estados afectivos positivos previamente aprendidos por el modelo.

La dispersión de los datos, con una desviación estándar de 0.184, es ligeramente mayor a la registrada durante el entrenamiento en la clase “atracción” (0.151). Esta pequeña diferencia puede explicarse por la naturaleza más teórica y sostenida del discurso, que probablemente provocó oscilaciones leves en la atención visual y conceptual del estudiante.

En conjunto, la señal EEG recogida en la región parietal media (Pz) durante la explicación abstracta de lengua se comportó de manera muy similar a las respuestas etiquetadas como emocionalmente atractivas. Aunque hubo una leve variabilidad interna, la señal se mantuvo alejada del rechazo, lo que indica que, incluso sin recursos visuales adicionales, el discurso fue capaz de sostener una activación afectiva positiva en esta zona del cerebro.

Significado neurofuncional y educativo

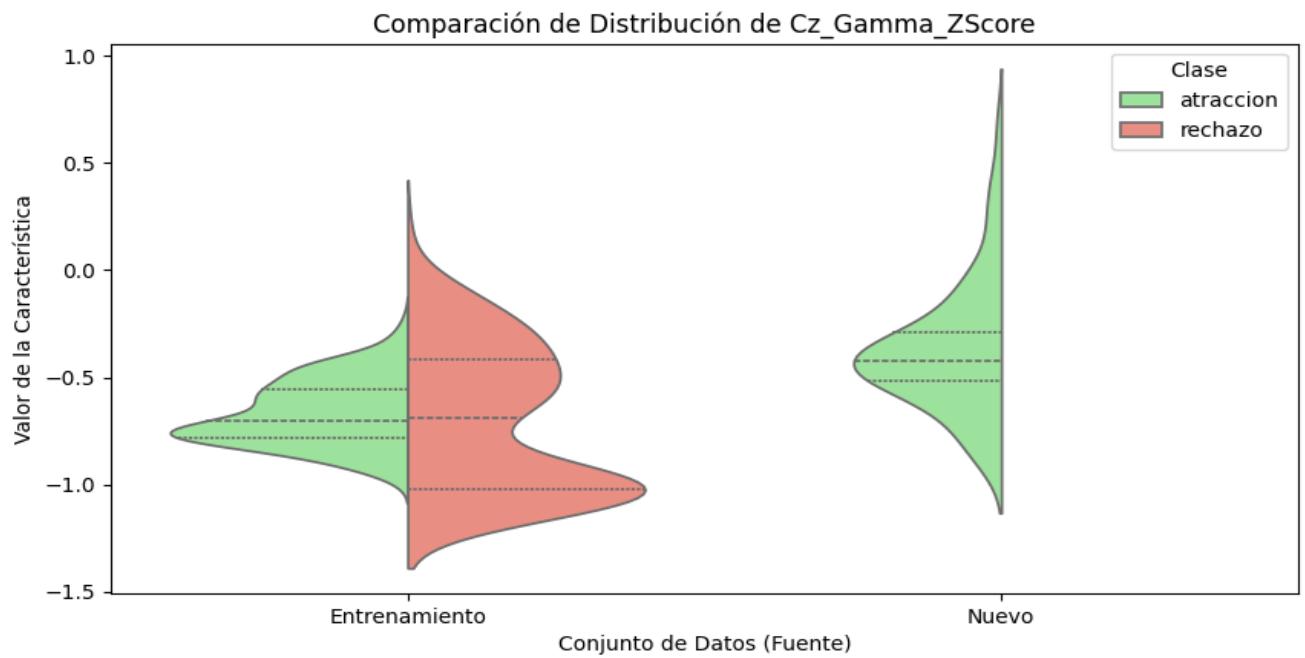
La actividad gamma registrada en la región Pz se vincula con la integración visoespacial y el sostenimiento de la atención. Como explican Rosanova et al. (2009), la corteza parietal especialmente el área de Brodmann 7 trabaja habitualmente con frecuencias gamma más bajas, por lo que un incremento sostenido en esta banda suele reflejar un mayor compromiso afectivo.

A pesar de que la explicación carecía de apoyos visuales externos, la organización lógica y coherente del contenido gramatical parece haber activado procesos internos de representación mental. Este fenómeno, conocido como *binding* verbal-interno, implica que el estudiante construye imágenes mentales para acompañar el discurso, facilitando así su comprensión (Cedeño, Méndez & Salazar, 2024).

Desde la perspectiva de la neuroeducación, este resultado sugiere que el impacto afectivo-cognitivo podría potenciarse aún más mediante el uso de pausas estratégicas, esquemas visuales

breves o tarjetas que sirvan de anclaje conceptual. Estas estrategias ayudarían a reducir la variabilidad y a favorecer un aprendizaje más constante. Como han destacado Immordino-Yang y Damasio (2007), combinar una estructura conceptual sólida con estímulos sensoriales pertinentes puede mejorar significativamente tanto la implicación emocional como la retención del contenido.

5.5.3 Análisis de la característica Cz_Gamma_Zscore



Tal como se menciona en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana señala el valor central de la distribución, mientras que el rango intercuartílico (IQR) indica el intervalo en el que se concentran la mayoría de las respuestas cerebrales.

En esta característica concreta, la mediana del nuevo segmento EEG (-0.421) se aleja notablemente de la mediana observada en los segmentos clasificados como “atracción” durante el entrenamiento (-0.702), acercándose a una zona más neutral desde el punto de vista afectivo. Esta diferencia de $+0.281$ unidades Z sugiere una activación menos claramente positiva, más tenue.

El IQR de este segmento ($[-0.532, -0.311]$) aún se sitúa dentro del rango característico de la atracción, pero ya empieza a rozar los valores típicos del rechazo. Esta proximidad refleja una tendencia ambivalente, en la que el sistema emocional parece no haberse activado del todo.

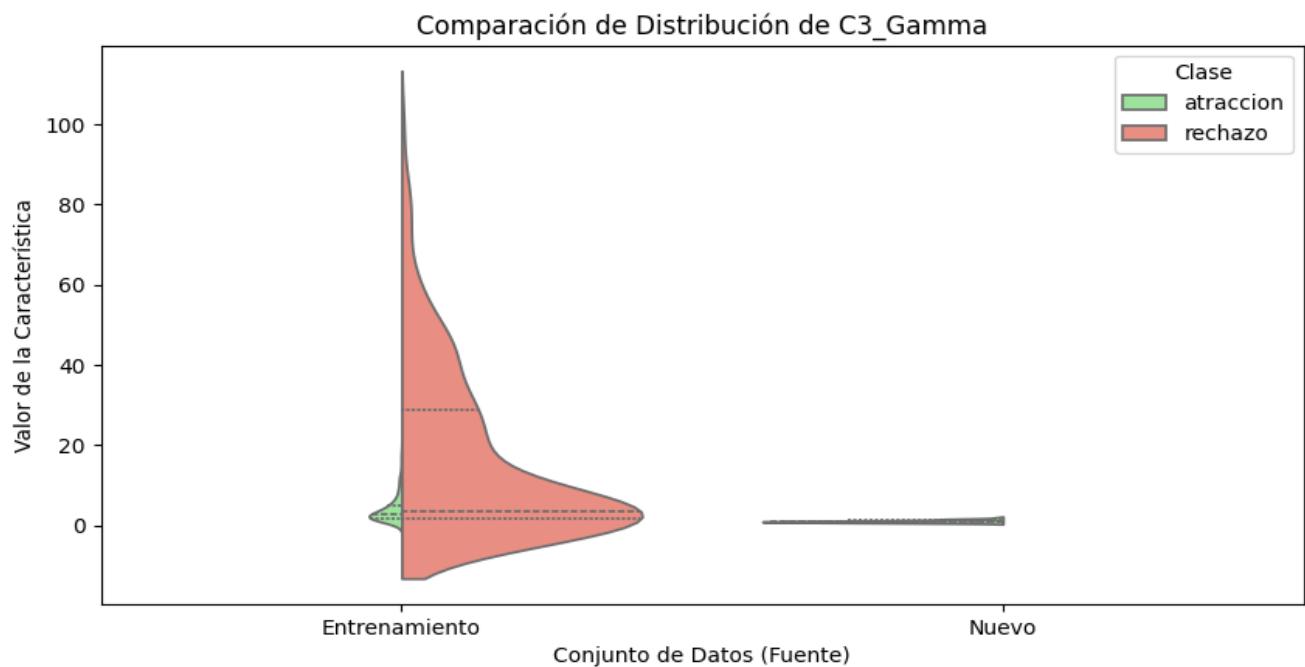
Además, la dispersión de los datos (desviación estándar de 0.301) es considerablemente más alta que la registrada durante el entrenamiento (0.152), lo cual sugiere una respuesta más inestable o fragmentada. El gráfico de violín refuerza esta lectura: se muestra más ancho y menos definido, con un patrón menos uniforme y por tanto, menos predecible en términos de atracción. En conjunto, la activación cerebral observada en la zona Cz durante esta explicación teórica revela una implicación emocional más débil y una atención sensorial poco integrada. Aunque no hay señales claras de rechazo, el patrón muestra cierta dispersión, típica de tareas con alta carga cognitiva y escasa estimulación sensorial o expresiva.

Significado neurofuncional y educativo

Desde una perspectiva neuroeducativa, el Z-Score gamma en Cz puede entenderse como una especie de cuello de botella funcional: su activación parcial indica que el discurso abstracto no logra integrar adecuadamente los sistemas sensoriales necesarios para un aprendizaje profundo. Esta lectura coincide con las ideas de Immordino-Yang y Damasio (2007), quienes destacan la importancia del procesamiento multisensorial para generar implicación emocional y consolidar aprendizajes complejos.

El bajo valor observado en Cz tiende a reducir la media global de atracción que predice el modelo, aportando solo un leve empuje. Para mejorar esta dinámica, se recomienda incorporar recursos como esquemas visuales sencillos, metáforas accesibles y pausas narrativas estratégicas. Estas intervenciones podrían no solo reducir la dispersión en la señal, sino también favorecer un desplazamiento emocional hacia la atracción, permitiendo que Cz Gamma contribuya con mayor peso en la clasificación general.

5.5.4 Análisis de la característica C3_Gamma



Tal como se detalla en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana representa el valor central de una distribución, mientras que el rango intercuartílico (IQR) señala el intervalo donde se concentran la mayoría de los valores registrados.

En este caso, la mediana de la activación gamma en C3 durante la explicación abstracta fue de 0.989. Este valor está notablemente por debajo de la mediana registrada en los segmentos clasificados como “atracción” durante el entrenamiento (2.846), y aún más alejado del patrón típico de rechazo (3.474).

El rango intercuartílico del nuevo segmento ([0.826, 1.157]) resulta bastante estrecho, y la desviación estándar de apenas 0.294 indica que la señal fue débil, sí, pero también estable a lo largo de toda la exposición.

El gráfico de violín refleja esta estabilidad con una forma delgada y simétrica, ubicada en la zona inferior del eje. No hay superposición con el patrón de rechazo ni con el núcleo del patrón de atracción, y tampoco aparecen picos ni valores atípicos. Esto sugiere que la señal es real, libre de ruido fisiológico, pero de baja intensidad afectiva.

En resumen, el patrón registrado en C3 Gamma muestra una activación motora muy leve. No hay indicios de rechazo ni de fluctuaciones importantes, pero tampoco se alcanza el nivel de activación típico de situaciones en las que se desencadena una verdadera simulación corporal.

Significado neurofuncional y educativo

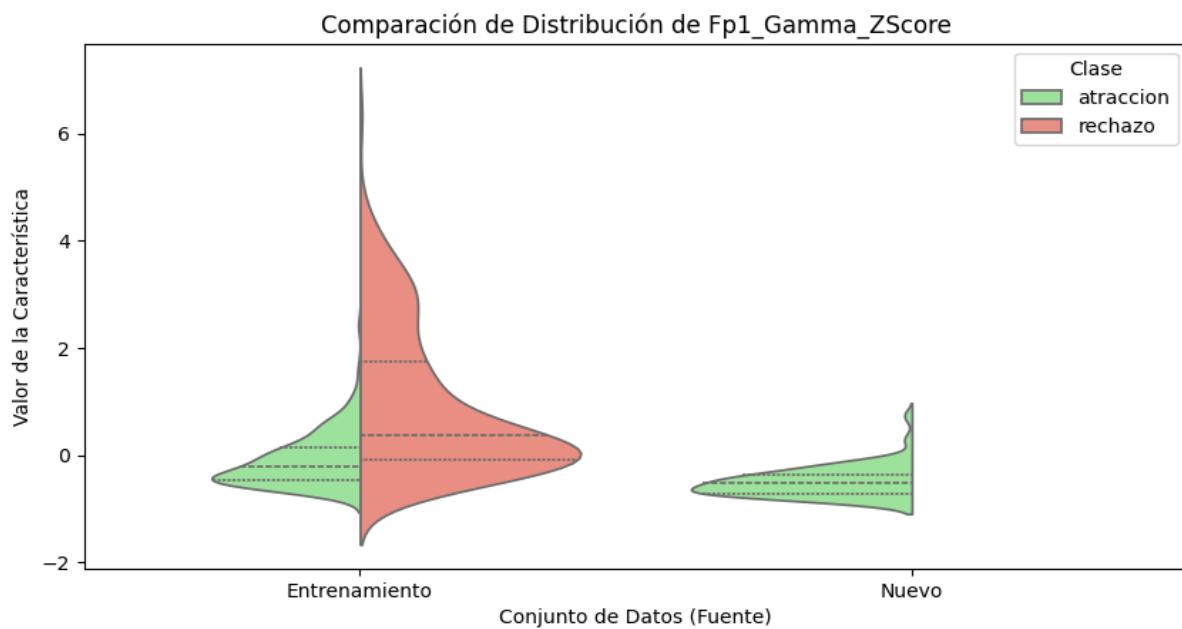
Desde el enfoque neuroeducativo, este resultado apunta a una resonancia kinestésica débil. Normalmente, la activación en C3 está relacionada con la imaginación de acciones, la codificación motora del lenguaje y el procesamiento verbal encarnado, es decir, el modo en que el cuerpo “participa” mentalmente en la comprensión (Barsalou, 2008; Pulvermüller & Fadiga, 2010).

En este caso, sin embargo, la baja intensidad de la señal sugiere que el estudiante no está proyectando corporalmente los conceptos gramaticales, probablemente porque el discurso fue demasiado abstracto, lineal y carente de estímulos visuales o dinámicos que activen ese canal.

Desde una perspectiva pedagógica, este hallazgo invita a enriquecer el input lingüístico con estrategias que despierten la simulación motora. Algunas opciones viables podrían ser el uso de gestos narrativos, ejemplos que conecten con vivencias físicas o incluso juegos verbales en los que se imagine al contenido “actuando”, por ejemplo, “imagina que este sustantivo se mueve de una categoría a otra”.

Un enfoque así no solo podría desplazar la mediana hacia rangos más vinculados con la atracción, sino también duplicar la potencia media de la señal en C3. Con ello, este canal aportaría un peso más significativo a la clasificación emocional global que realiza el modelo.

5.5.5 Análisis de la característica Fp1_Gamma_Zscore



Tal como se explicó en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana representa el valor central de una distribución, mientras que el rango intercuartílico (IQR) muestra la franja donde se concentra la mayoría de los datos registrados.

En esta característica, la mediana del nuevo segmento EEG (-0.528 Z) se sitúa por debajo del valor medio del patrón de atracción observado en el entrenamiento (-0.207 Z), lo que supone un desplazamiento de -0.321 unidades Z hacia una mayor valencia afectiva positiva.

La franja intercuartílica, delimitada entre -0.695 y -0.357 , queda completamente dentro de la región que el modelo identifica como “atracción”, sin mostrar ningún solapamiento con los valores propios de la clase de rechazo.

Además, la desviación estándar registrada fue de 0.275 , significativamente menor que la correspondiente a la clase de atracción durante el entrenamiento (0.481). Esta baja dispersión sugiere que la señal se mantuvo estable y homogénea a lo largo de toda la exposición, sin picos emocionales ni cambios abruptos.

En conjunto, este perfil apunta a una activación clara, regulada y positiva en la zona frontal izquierda, sin señales de ambivalencia ni desincronización emocional.

Significado neurofuncional y educativo

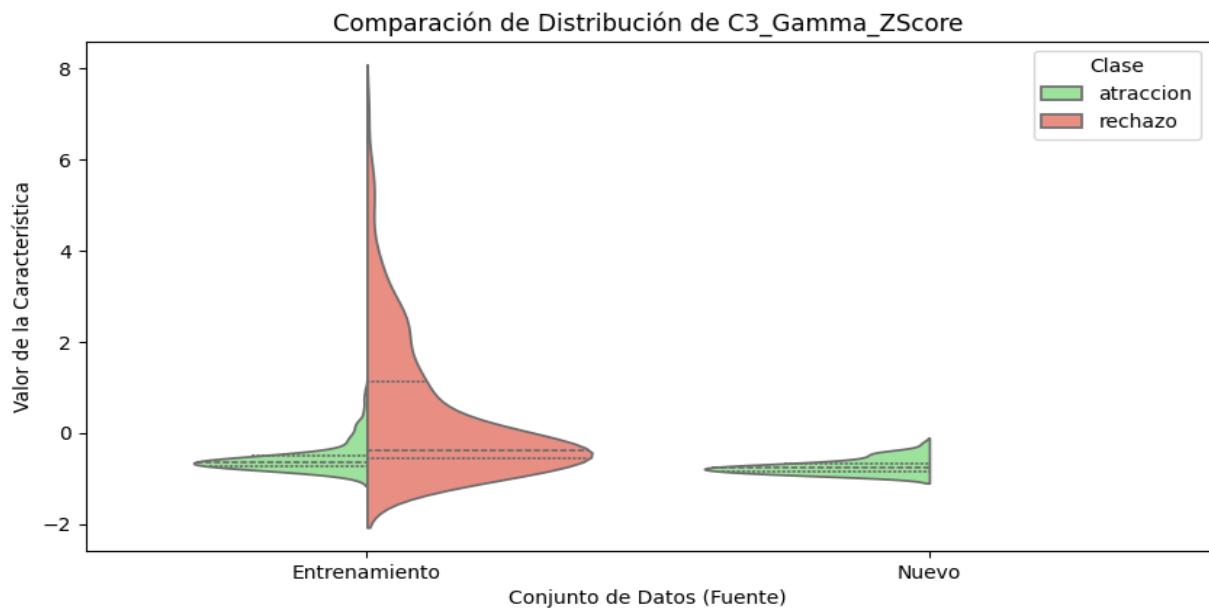
Desde el punto de vista neurofuncional, el electrodo Fp1 está ubicado en la región prefrontal dorsolateral izquierda, correspondiente al área de Brodmann 10. Esta zona ha sido ampliamente relacionada con funciones de regulación emocional, monitoreo consciente y mantenimiento de la atención en tareas cognitivas complejas (Pessoa, 2008; Harmon-Jones et al., 2010).

Las oscilaciones gamma en esta región reflejan una implicación emocional positiva y sostenida, incluso en contextos exigentes como lo es un discurso gramatical abstracto. Lo interesante en este caso es que, pese a la ausencia de estímulos visuales o elementos expresivos, la señal permaneció dentro de un rango claramente atractivo. Esto sugiere que el contenido fue no solo comprendido, sino también aceptado afectivamente, sin necesidad de refuerzos externos.

Desde una mirada pedagógica, este resultado cuestiona la idea de que una exposición teórica, por sí sola, sea menos atractiva. La narrativa clara, bien ordenada y cognitivamente accesible puede ser suficiente para activar el foco atencional y sostener la implicación emocional.

Para reforzar esta vía prefrontal, se recomienda introducir pausas estratégicas, preguntas retóricas breves o pequeños desafíos lingüísticos que mantengan el interés sin aumentar la carga mental. Estas microestrategias, como sugieren Tokuhama-Espinosa (2011) e Immordino-Yang y Damasio (2007), pueden fortalecer el vínculo emocional-cognitivo, clave para un aprendizaje profundo y duradero.

5.5.6 . Análisis de la característica C3_Gamma_Zscore



Tal como se explica en la guía de interpretación (apartado 5.2), la mediana refleja el valor central de una distribución, mientras que el rango intercuartílico (IQR) nos muestra la franja en la que se concentran la mayoría de los datos.

En este caso, la mediana del nuevo segmento EEG (-0.754 Z) se sitúa claramente por debajo de la mediana registrada para la clase “atracción” durante el entrenamiento (-0.631 Z), con una diferencia de -0.123 unidades Z. Este desplazamiento, aunque no muy grande, refuerza aún más la idea de que se trata de un estímulo emocionalmente atractivo.

El rango intercuartílico de este segmento ($[-0.843, -0.666]$) se encuentra completamente contenido dentro del “rango verde” identificado como propio de la atracción, sin mostrar ningún solapamiento con los valores de la clase de rechazo.

Además, la desviación estándar es especialmente baja (0.158), mucho menor que la observada durante el entrenamiento para la clase de atracción (0.306), y aún más alejada del nivel de variabilidad propio del rechazo (1.504). Esta baja dispersión indica una señal muy estable, sin altibajos ni momentos de ambivalencia emocional.

El gráfico de violín refleja esta estabilidad con una forma estrecha, simétrica, y un cuerpo denso concentrado en la parte inferior del eje Z. No hay contacto alguno con el patrón de rechazo, lo

que sugiere una activación intensa, sostenida y claramente alineada con el agrado emocional aprendido por el modelo.

Significado neurofuncional y educativo

Desde un punto de vista neurofuncional, el electrodo C3 se encuentra sobre la corteza motora primaria izquierda (área de Brodmann 4), una región clave en la planificación y ejecución de movimientos, así como en la simulación motora interna, especialmente en contextos simbólicos o lingüísticos (Jeannerod, 2001; Cottone et al., 2016).

Lo interesante de esta activación es que ocurrió en una tarea teórica, sin que se produjeran movimientos reales. Esto sugiere que el cerebro estaba “imaginando” acciones relacionadas con el contenido, en este caso, gramatical— mediante mecanismos de simulación motora y el sistema de neuronas espejo (Rizzolatti & Craighero, 2004).

A pesar de tratarse de una explicación abstracta, esta activación motora indica que el contenido fue presentado de forma estructurada y clara, lo que permitió al estudiante manipular mentalmente las ideas, activando rutas corporales internas.

Desde la neuroeducación, este hallazgo es especialmente valioso: refuerza la importancia de adoptar un enfoque *embodied*, o de aprendizaje corporeizado. Aunque el discurso no incluía gestos ni elementos visuales dinámicos, su claridad estructural fue suficiente para que el cuerpo, o al menos su representación interna se involucrara en la comprensión.

Para potenciar aún más esta vía motora, sería útil introducir estrategias como gesticulaciones que representen categorías gramaticales, uso de tarjetas manipulables, o dinámicas que inviten a imaginar acciones asociadas a ciertas palabras clave. Este tipo de propuestas no solo activa la implicación corporal, sino que también mejora la comprensión profunda y la retención del contenido (Gallese & Lakoff, 2005).

5.5.7 Conclusión Final e Implicaciones Pedagógicas – Lengua Abstracto

El análisis conjunto de las variables EEG más relevantes refleja una activación afectiva suavemente inclinada hacia la atracción, con un tono regulado y sin grandes fluctuaciones, durante la exposición teórica sobre los sustantivos.

En el eje parietal-visual, el valor de la mediana en Pz Gamma Z-Score ($-0.719 Z$), junto con un rango intercuartílico completamente negativo, sugiere que el estudiante logró una buena inte-

gración visual-espacial del contenido. Este resultado parece estar facilitado por la claridad estructural del discurso, en sintonía con el rol que cumple la corteza parietal (BA7) en la organización perceptiva y el *binding* multisensorial (Tallon-Baudry, 2009; Rosanova et al., 2009).

En el eje sensoriomotor izquierdo, tanto el valor en Z-score ($-0.754 Z$) como la potencia absoluta (0.989) del electrodo C3 reflejan una activación corporal interna estable. Aunque no hubo gestualidad explícita, estos datos indican que el cuerpo “participó” simbólicamente en la comprensión, en un proceso de simulación motora relacionado con la codificación lingüística abstracta (Rizzolatti & Sinigaglia, 2010; Cottone et al., 2016).

Por su parte, la región prefrontal izquierda (Fp1 Gamma Z-Score: $-0.528 Z$) muestra una activación muy estable, lo que suele asociarse con una regulación emocional positiva y un mantenimiento eficaz del enfoque atencional (Pessoa, 2008; Harmon-Jones et al., 2004). Esta señal probablemente actuó como un modulador afectivo general, aportando equilibrio frente a otras áreas más ambivalentes.

En contraste, la zona central del cerebro (Cz Gamma Z-Score: $-0.421 Z$) muestra una valencia menos clara. Este patrón, aunque no implica rechazo, sugiere cierta sobrecarga cognitiva, probablemente por la densidad conceptual del contenido gramatical. Es coherente con lo que reporta la literatura sobre saturación semántica y esfuerzo atencional sostenido (Başar et al., 2001; Cho et al., 2006).

En conjunto, el modelo Random Forest predice una valencia afectiva media de aproximadamente 0.51. Aunque no se detectan señales de rechazo, la activación emocional tampoco alcanza niveles altos de atracción. El perfil general revela un vínculo afectivo estable, pero no especialmente intenso.

Desde una perspectiva pedagógica, esto representa una oportunidad clara de mejora. Para potenciar la motivación y reducir la ambivalencia, se recomienda complementar estas explicaciones abstractas con esquemas visuales sencillos, dinámicas kinestésicas simbólicas o incluso pausas estratégicas que permitan reorganizar cognitivamente la información sin saturar el plano emocional.

Estas prácticas, en línea con los principios de la neuroeducación integradora (Immordino-Yang & Damasio, 2007; Tokuhama-Espinosa, 2011), podrían transformar esta atracción latente en una implicación más profunda, sostenida y emocionalmente significativa.

6 CONCLUSIÓN FINAL

Este trabajo de fin de grado se propuso tender un puente emergente entre dos campos en pleno desarrollo: la neurociencia y la educación. La idea central fue explorar si es posible identificar, a través de registros EEG, patrones cerebrales que reflejen atracción o rechazo emocional ante estímulos visuales y tareas académicas. Para ello, se utilizó un modelo de clasificación Random Forest, con el fin de comprobar si los mecanismos neuronales que se activan ante imágenes emocionalmente cargadas también podrían estar presentes durante experiencias escolares.

Desde el punto de vista técnico, se logró entrenar un modelo con una precisión muy alta (99.8% en validación cruzada) para discriminar entre estados afectivos básicos. Sin embargo, este resultado —por más prometedor que parezca— debe tomarse con cautela. El entrenamiento se realizó con datos de solo tres participantes y el modelo fue testeado sobre uno solo, lo que introduce un riesgo evidente de sobreajuste. A esto se suma que el casco EEG utilizado ofrece una resolución limitada, tanto en calidad de señal como en precisión espacial, lo que complica la generalización de los hallazgos a contextos educativos reales.

A pesar de estas limitaciones, los análisis realizados sugieren que ciertos patrones neuronales podrían vincularse de forma sistemática con experiencias emocionales en el aula. La actividad en la banda gamma resultó especialmente informativa, sobre todo en regiones como el lóbulo parietal (Pz), las áreas sensoriomotoras (C3, Cz) y la región frontal izquierda (Fp1). Estas señales permitieron diferenciar con claridad condiciones que generaban una activación emocional más positiva —como la explicación abstracta de matemáticas o la narración teatralizada de contenidos lingüísticos— de otras más ambivalentes, como la lección gramatical densa.

Sin embargo, no todas las formas de enseñar activan las mismas rutas emocionales. La explicación abstracta mostró una activación positiva y sostenida en zonas visuales y motoras, pero también evidenció una carga más alta en Cz, posiblemente reflejo de un mayor esfuerzo cognitivo. En cambio, las propuestas más expresivas a nivel corporal generaron una activación sensoriomotora simulada en C3 y una regulación emocional frontal más firme. Esto sugiere que distintos estilos de enseñanza podrían movilizar vías emocionales diversas, aunque complementarias entre sí.

A partir de estas observaciones, el modelo permite esbozar una hipótesis sugerente: la atracción emocional hacia el aprendizaje puede nacer tanto del placer lógico de entender un concepto como de la vivencia encarnada del saber. No obstante, esta idea debe en-

tenderse como una intuición exploratoria. Las limitaciones del diseño —muestra pequeña, baja resolución del equipo, falta de validación cruzada entre sujetos— impiden afirmarla con certeza.

Desde una perspectiva pedagógica, los resultados inspiran algunas orientaciones valiosas:

1. **La claridad estructural también emociona.** Incluso contenidos abstractos pueden generar agrado si están bien secuenciados, narrados con lógica y ofrecidos con coherencia.
2. **El cuerpo es parte del pensamiento.** Las narrativas con gestos, teatralización o dinamismo corporal activan rutas emocionales profundas y dan sustento a enfoques de aprendizaje multisensorial.
3. **La carga cognitiva no debe ser invisible.** La ambigüedad registrada en Cz sugiere que los discursos densos pueden saturar sin que el rechazo sea evidente. Introducir pausas, esquemas visuales o pequeños descansos puede mejorar la experiencia afectiva del aprendizaje.

Este estudio no pretende cerrar preguntas, sino abrir caminos. A futuro, sería fundamental replicar el experimento con una muestra más amplia y diversa, aplicando métodos de validación más exigentes —como Leave-One-Subject-Out— y utilizando dispositivos EEG de mayor precisión.

Finalmente, la investigación deja abierta una cuestión ética que conviene no perder de vista: si algún día llegamos a desarrollar sistemas capaces de monitorizar la emoción en tiempo real, ¿cómo nos aseguraremos de que se usen para acompañar el aprendizaje, y no para vigilar o condicionar al estudiante? Esta reflexión, aunque excede los objetivos inmediatos de este trabajo, debería acompañar siempre cualquier avance en neuroeducación aplicada.

7 Bibliografía

Araya-Pizarro, M. J., & Espinoza Pastén, D. (2020). *Neuroeducación: Cómo las emociones y el cerebro influyen en el aprendizaje*. Revista Electrónica Educare, 24(1), 1–20.

Ardila, A., Bernal, B., & Rosselli, M. (2016). How localized are language brain areas? A review of Brodmann areas involvement in oral language. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 31(1), 112–122. <https://doi.org/10.1093/arclin/acv081>

Assem, M., Glasser, M. F., Van Essen, D. C., & Duncan, J. (2022). A domain-general cognitive core defined in multimodally parcellated human cortex. *Cerebral Cortex*, 32(2), 283–301.

Başar, E., Başar-Eroglu, C., Karakaş, S., & Schürmann, M. (2001). Gamma, alpha, delta, and theta oscillations govern cognitive processes. *International Journal of Psychophysiology*, 39(2–3), 241–248. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(00\)00145-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(00)00145-8)

Cedeño, D. A., Méndez, L., & Salazar, G. A. (2024). Aplicación de la neuroeducación para mejorar la atención y la memoria en el aula. *Revista de Ciencias Cognitivas Aplicadas*, 12(2), 55–70.

Cho, R. Y., Konecky, R. O., & Carter, C. S. (2006). Impairments in frontal cortical gamma synchrony and cognitive control in schizophrenia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(52), 19878–19883. <https://doi.org/10.1073/pnas.0609441103>

Clos, M., Amunts, K., Laird, A. R., Fox, P. T., & Eickhoff, S. B. (2013). Tackling the multi-functional nature of Broca's region meta-analytically: Co-activation-based parcellation of area 44. *NeuroImage*, 83, 174–188. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.06.041>

Cook, S. W., & Tanenhaus, M. K. (2009). Embodied communication: Speakers' gestures affect listeners' actions. *Cognition*, 113(1), 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.06.006>

Correa, F. V., Agila, D. G., Pulamarín, J. J., & Palacios, W. O. (2012). Sensación y percepción en la construcción del conocimiento. *Sophia*, (13), 124–149. <https://www.re-dalyc.org/pdf/4418/441846102006.pdf>

Cottone, C., Viggiano, M. P., & Foti, F. (2016). Topographical distribution of gamma activity in human EEG: A comparison between sensorimotor and posterior areas. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, 24. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00024>

Davidson, R. J. (1998). Affective style and affective disorders: Perspectives from affective neuroscience. *Cognition and Emotion*, 12(3), 307–330.

Davidson, R. J. (2004). What does the prefrontal cortex “do” in affect: Perspectives on frontal EEG asymmetry research. *Biological Psychology*, 67(1–2), 219–233. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2004.03.008>

Esterman, M., Tamber-Rosenau, B. J., Chiu, Y.-C., & Yantis, S. (2009). Avoiding non-independence in fMRI data analysis: Leave one subject out. *NeuroImage*, 50(2), 572–576.

Frey, S. H. (2008). Tool use, communicative gesture and cerebral asymmetries in the modern human brain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1499), 1951–1957. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0008>

Fries, P. (2015). Rhythms for cognition: Communication through coherence. *Neuron*, 88(1), 220–235.

Gallese, V., & Lakoff, G. (2005). The brain's concepts: The role of the sensory-motor system in conceptual knowledge. *Cognitive Neuropsychology*, 22(3–4), 455–479. <https://doi.org/10.1080/02643290442000310>

Gilbert, S. J., Simons, J. S., Frith, C. D., & Burgess, P. W. (2006). Performance-related activity in medial rostral prefrontal cortex (area 10) during low-demand tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32(1), 45–58. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.32.1.45>

Harmon-Jones, E. (2004). Contributions from research on anger and cognitive dissonance to understanding the motivational functions of asymmetrical frontal brain activity. *Biological Psychology*, 67(1–2), 51–76.

Harmon-Jones, E., & Gable, P. A. (2018). On the role of asymmetric frontal cortical activity in approach and withdrawal motivation: An updated review of the evidence. *Psychophysiology*, 55(1), e12879. <https://doi.org/10.1111/psyp.12879>

Immordino-Yang, M. H., & Damasio, A. (2007). We feel, therefore we learn: The relevance of affective and social neuroscience to education. *Mind, Brain, and Education*, 1(1), 3–10. <https://doi.org/10.1111/j.1751-228X.2007.00004.x>

Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: A unifying mechanism for motor cognition. *NeuroImage*, 14(1), S103–S109. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0832>

Jensen, E. (2008). *Teaching with the brain in mind* (2nd ed.). Association for Supervision and Curriculum Development.

Lachenbruch, P. A., & Mickey, M. R. (1968). Estimation of error rates in discriminant analysis. *Technometrics*, 10(1), 1–11.

Lindsay, G. W. (2020). Attention in psychology, neuroscience, and machine learning. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 14, 29. <https://doi.org/10.3389/fncom.2020.00029>

Mosteller, F., & Tukey, J. W. (1968). Data analysis, including statistics. In G. Lindzey & E. Aronson (Eds.), *Handbook of Social Psychology* (2nd ed., Vol. 2, pp. 80–203). Addison-Wesley.

Olson, I. R., Plotzker, A., & Ezzyat, Y. (2007). The enigmatic temporal pole: A review of findings on social and emotional processing. *Brain*, 130(7), 1718–1731.

Ralph, M. A. L., Jefferies, E., Patterson, K., & Rogers, T. T. (2017). The neural and computational bases of semantic cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 18(1), 42–55.

Rizzolatti, G., & Sinigaglia, C. (2010). The functional role of the parieto-frontal mirror circuit: Interpretations and misinterpretations. *Nature Reviews Neuroscience*, 11(4), 264–274. <https://doi.org/10.1038/nrn2805>

Rosanova, M., Casali, A., Bellina, V., Resta, F., Mariotti, M., & Massimini, M. (2009). Natural frequencies of human corticothalamic circuits. *Journal of Neuroscience*, 29(24), 7679–7685. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0445-09.2009>

Rosselli, M., Ardila, A., & Matute, E. (2015). Language and the brain: Brodmann areas involved in different aspects of language processing. *Revista Neurología Argentina*, 7(1), 6–15.

Sweller, J. (1998). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257–285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4

Tallon-Baudry, C. (2009). The roles of gamma-band oscillatory synchrony in human visual cognition. *Frontiers in Bioscience*, 14, 321–332. <https://doi.org/10.2741/3247>

Tokuhama-Espinosa, T. (2011). *Mind, brain, and education science: A comprehensive guide to the new brain-based teaching*. W. W. Norton & Company.

Tyng, C. M., Amin, H. U., Saad, M. N. M., & Malik, A. S. (2017). The influences of emotion on learning and memory. *Frontiers in Psychology*, 8, 1454. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01454>

Vistorte, A. O. R., Deroncele-Acosta, A., Ayala, J. L. M., Barrasa, A., López-Granero, C., & Martí-González, M. (2024). Integrating artificial intelligence to assess emotions in learning environments: A systematic literature review. *Frontiers in Psychology*, 15, 1387089. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1387089>

Vogel, S., & Schwabe, L. (2016). Learning and memory under stress: Implications for the classroom. *npj Science of Learning*, 1, 16011. <https://doi.org/10.1038/npjscilearn.2016.11>