

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONAHCYT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos de Autor.

CICESE © 2023, Todos los Derechos Reservados, CICESE

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California



Doctorado en Ciencias en Ciencias de la Computación

Interfaces hápticas para identificar marcadores digitales del Trastorno del Espectro Autista

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Doctor en Ciencias

Presenta:

Gloria Ivonne Monarca Pintle

Ensenada, Baja California, México

2023

Tesis defendida por

Gloria Ivonne Monarca Pintle

y aprobada por el siguiente Comité

Dra. Mónica Elizabeth Tentori Espinosa

Codirectora de tesis

Dr. Franceli Linney Cibrian Robles

Codirectora de tesis

Dr. Jesús Favela Vara

Dr. Edgar Leonel Chávez González

Dra. Rosa Isela Arriaga



Dr. Pedro Gilberto López Mariscal

Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Computación

Dra. Ana Denise Re Araujo

Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta Gloria Ivonne Monarca Pintle como requisito parcial para la obtención del grado de Doctor en Ciencias en Ciencias de la Computación .

Interfaces hápticas para identificar marcadores digitales del Trastorno del Espectro Autista

Resumen aprobado por:

Dra. Mónica Elizabeth Tentori Espinosa

Codirectora de tesis

Dr. Franceli Linney Cibrian Robles

Codirectora de tesis

El uso de herramientas de cribado durante la infancia es de suma importancia para identificar a niños que pueden Trastorno del Espectro Autista (TEA); sin embargo, las pruebas que existen en la actualidad se basan en cuestionarios y observaciones contestadas por los padres por lo que el resultado puede ser subjetivo. Además, la mayoría de las pruebas de cribado se enfocan en el área social y de comunicación, dejando a un lado las características sensoriales, un área donde los padres notan las primeras señales de un desarrollo atípico. En los últimos años, ha crecido el interés por identificar marcadores digitales del TEA que puedan apoyar el cribado de dicho trastorno, usando tecnología que pueda ser usada en cualquier lugar y momento para agilizar el proceso de cribado. Hasta el momento, la investigación en torno a marcadores digitales del TEA relacionados con el procesamiento táctil, ha sido poco explorada debido a que la investigación se ha centrado en explorar otros comportamientos, como la atención visual, movimientos motores, y voz. El crecimiento de las interfaces hápticas abre la posibilidad de explorar el procesamiento táctil e identificar marcadores digitales del TEA. En esta tesis exploramos si las interfaces hápticas pueden ser usadas para promover y recolectar interacciones táctiles que revelen marcadores digitales del TEA. Para tener un mejor entendimiento de las interfaces hápticas, en este trabajo de tesis exploramos dos interfaces hápticas. Una interfaz háptica pasiva llamada *BendableSound*, la cual cuenta con una retroalimentación por textura y espacio; y una interfaz háptica activa llamada *Feel and Touch*, la cual es un juego móvil que utiliza patrones vibrotáctiles para retroalimentar las interacciones de los niños. Los resultados muestran que las interfaces hápticas tienen la capacidad recolectar interacciones táctiles y revelar marcadores digitales que pueden estar asociados al TEA. En el caso pasivo, participaron 37 niños neurotípicos (NT) y 22 niños con TEA quienes interactuaron con *BendableSound*; los resultados muestran que existen diferencias entre los niños NT y TEA en cuanto al ancho de las interacciones táctiles, la fuerza que aplican y el tiempo que utilizan para realizar interacciones táctiles. En el caso activo, participaron 36 niños NT y 19 niños con TEA quienes interactuaron con *Feel and Touch*; los resultados muestran que existen diferencias entre los niños NT y TEA en cuanto a la inclinación que producen en el móvil al realizar interacciones táctiles, la aceleración total que producen y la cercanía al centro de la pantalla de sus interacciones táctiles. Los resultados de esta tesis indican que las interfaces hápticas tienen la capacidad de recolectar interacciones táctiles y revelar marcadores digitales asociados al TEA; los resultados de esta tesis podrían ser usados como base para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el campo del TEA y su interacción táctil.

Palabras clave: autismo, cribado, marcadores digitales, interfaces hápticas, aprendizaje automático

Abstract of the thesis presented by Gloria Ivonne Monarca Pintle as a partial requirement to obtain the Doctor of Science degree in Computer Science .

Haptic interfaces to identify digital markers of Autism Spectrum Disorder

Abstract approved by:

PhD. Monica Elizabeth Tentori Espinoza

Thesis Co-Director

PhD. Franceli Linney Cibrian Robles

Thesis Co-Director

The use of screening tools during infancy is crucial to identify children who are likely to have Autism Spectrum Disorder (ASD); however, the current screening tests are based on questionnaires and observations that parents answer based on their observations; however, the results might be subjective. In addition, most screening tests focus on the assessment of social and communication skills, disregard sensory skills, an area where parents often notice the first signals of ASD. In recent years, there has been growing interest in identifying digital markers of ASD that can support screening, particularly those that can be used at any time and any place to speed up the screening process. So far, research on digital markers of ASD related to tactile processing has been little explored due to the lack of tools to assess it. The growth of haptic interfaces opens the possibility to explore tactile processing and identify digital markers of ASD. In this thesis, we propose to investigate the use of haptic interfaces to promote and collect tactile interactions that can reveal digital markers of ASD. To have a better understanding of haptic interfaces, in this thesis work we explore two types of haptic interface. A passive haptic interface called *BendableSound*, which features texture and spatial feedback; and an active haptic interface called *Feel and Touch*, which is a mobile game that uses vibrotactile patterns to provide feedback on children's interactions. The results show that haptic interfaces have the potential to collect touch interactions and reveal digital markers that may be associated with ASD. In the first case, 37 neurotypical (NT) children and 22 children with ASD participated and interacted with BendableSound; the results show that there are differences between NT and ASD children in the width of tactile interactions, the force they apply, and the time they use to perform tactile interactions. In the second case, 36 NT children and 19 children with ASD participated and interacted with Feel and Touch; the results show that there are differences between NT and ASD children in terms of the tilt they produce on the mobile when performing tactile interactions, the total acceleration they produce, and the closeness to the center of the screen of their tactile interactions. The results of this thesis indicate that haptic interfaces have the ability to gather touch interactions and uncover digital markers associated with ASD. The findings of this thesis could serve as a foundation for future research and practical applications in the field of ASD and its touch interaction.

Keywords: autism, screening, digital markers, haptic interfaces, machine learning

Dedicatoria

Dedico este trabajo de tesis a mi familia y amigos cuyo amor inquebrantable y apoyo constante me han sostenido en los momentos de desafío. Sin su aliento y paciencia, este logro no habría sido posible.

Agradecimientos

Quiero expresar mi sincero agradecimiento al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California por proporcionar los recursos y el entorno propicio para llevar a cabo esta investigación. También, al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por el apoyo financiero brindado durante mis estudios de posgrado.

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, porque he visto muchas de sus promesas cumplidas, y sé que este logro es parte de lo que él tiene destinado para mi vida, Salmos 138:8.

Mi familia merece un agradecimiento especial por su amor, aliento y apoyo inquebrantable. Mis padres, hermanos, tíos y primos, todos han contribuido de alguna manera a mi formación y en las decisiones que me llevaron a terminar mis estudios de posgrado.

Agradezco a mis amigas Karina y Nancy, que siempre han estado durante años para escucharme y aconsejarme cuando lo necesito, su amistad me ha dado mucha alegría y fortaleza; también a Fany, Nohemi y Gloria, sé que ustedes han sido un regalo de Dios en mi vida, y aunque nuestra amistad ha sido corta, me han hecho sentir que tengo otra familia en Ensenada, gracias por todo.

A mis compañeros de laboratorio, en especial a Coni, mi compañera de café y chismes del posgrado; gracias por escucharme, por estar ahí cuando necesitaba llorar y desahogarme. Fuiste un apoyo muy importante estos años, y las experiencias que vivimos juntas siempre las voy a recordar con mucho cariño.

Agradezco, también, a los pelícanos viajeros y al equipo de atletismo; todas las caminatas y carreras hicieron más amenas mis semanas, y ayudaron a relajarme; en especial, quiero agradecer a Marina, quien durante estos años ha sido una mamá-amiga para mí, por motivarme y ser un ejemplo de que siempre se puede; al profe Humberto, por todos los consejos y entrenamientos; también quiero dar un agradecimiento especial a Ricardo, por todo el apoyo que me ha dado; gracias por ser mi compañero de carreras y caminatas, por empujarme cuando ya no podía, por darme la mano en cada bajada, por levantarte cada domingo para salir a correr juntos, por abrirme las puertas de tu casa, tú y tu familia han hecho que los días sean menos solitarios, gracias por todo.

También quiero agradecer a los miembros de mi comité de tesis, en especial a mis asesoras, por sus valiosas sugerencias y revisiones críticas que enriquecieron significativamente este trabajo.

Por último, quiero expresar mi sincera gratitud a todas las personas e instituciones que han contribuido de manera significativa a la realización de este trabajo de investigación y a mi formación académica.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	x
Lista de tablas	xiii
Capítulo 1. Introducción	
1.1. Trastorno del Espectro Autista (TEA)	1
1.1.1. Problemas sensoriales de los niños con TEA	2
1.2. Cribado del TEA	3
1.3. Marcadores digitales	5
1.4. Interfaces hápticas	6
1.4.1. Patrones vibrotáctiles	8
1.4.2. Superficies elásticas	10
1.5. Preguntas de investigación	10
1.6. Objetivo general	11
1.6.1. Objetivos específicos	11
1.7. Metodología	12
1.7.1. Fase 1 Diseño e implementación	12
1.7.1.1. Diseño	12
1.7.1.2. Implementación	13
1.7.2. Fase 2 Diseño del estudio y recolección de datos	13
1.7.2.1. Diseño del estudio	14
1.7.2.2. Recolección de datos	14
1.7.3. Fase 3 Preparación de los datos, creación y evaluación de modelos de clasificación	14
1.7.3.1. Preparación de los datos	15
1.7.3.2. Análisis de las características	15
1.7.3.3. Construcción y evaluación de modelos	16
Capítulo 2. Trabajo previo	
2.1. Marcadores digitales del TEA	17
2.1.1. Marcadores digitales basados en sensado de comportamiento	17
2.1.2. Marcadores digitales del autismo basados en interacción	20
2.2. Interfaces hápticas	23
2.2.1. Interfaces hápticas como herramientas de aprendizaje	23
2.2.2. Interfaces hápticas como herramientas terapéuticas	25
2.2.3. Interfaces hápticas para evaluar habilidades sensomotoras de niños	27
2.3. Resumen	29

Capítulo 3. Caso de estudio interfaz háptica pasiva

3.1.	Objetivo	31
3.2.	Interfaz háptica pasiva: BendableSound	32
3.2.1.	Método de diseño	32
3.2.2.	Diseño e implementación	33
3.2.2.1.	Diseño de BendableSound	33
3.2.2.2.	Implementación de BendableSound	34
3.2.3.	Escenario de uso	36
3.2.4.	Evaluación	36
3.2.4.1.	Participantes	37
3.2.4.2.	Métodos	37
3.2.4.3.	Análisis de los datos	38
3.2.4.4.	Resultados	38
3.3.	Captura y caracterización de datos para la identificación de marcadores digitales del TEA	40
3.3.1.	Participantes	40
3.3.2.	Procedimiento	41
3.3.3.	Recolección de datos	42
3.3.4.	Preparación de los datos	43
3.3.4.1.	Conjuntos de datos sintéticos	43
3.3.5.	Extracción de características	44
3.3.6.	Análisis de las características	45
3.3.6.1.	Reducción y selección de características	45
3.3.6.2.	Análisis exploratorio	46
3.3.7.	Evacuación de modelos de clasificación	46
3.4.	Resultados	49
3.4.1.	Marcadores digitales	49
3.4.1.1.	Fuerza	50
3.4.1.2.	Espacio	50
3.4.1.3.	Tiempo	50
3.4.2.	Rendimiento modelo de clasificación sin datos sintéticos	51
3.4.2.1.	Validación del modelo	52
3.4.2.2.	Rendimiento modelo de clasificación con datos sintéticos	53
3.5.	Discusión y conclusión caso de estudio	54

Capítulo 4. Caso de estudio interfaz háptica activa

4.1.	Objetivo	56
4.2.	Interfaz háptica activa: Feel and Touch	56
4.2.1.	Métodos de diseño	57
4.2.2.	Diseño e implementación	58
4.2.2.1.	Patrones vibrotáctiles y gestos	58
4.2.2.2.	Diseño de Feel and Touch	59
4.2.2.3.	Implementación de Feel and Touch	61
4.2.3.	Escenario de uso	62
4.2.4.	Adopción y percepción de experiencia de uso	63
4.2.4.1.	Participantes	63
4.2.4.2.	Métodos	63
4.2.4.3.	Resultados	64

4.3.	Captura y caracterización de datos para la identificación de marcadores digitales del TEA	64
4.3.1.	Participantes	64
4.3.2.	Procedimiento	66
4.3.3.	Recolección de datos	68
4.3.4.	Preparación de los datos y creación de conjunto de datos	68
4.3.5.	Extracción de características	68
4.3.6.	Análisis de las características	69
4.3.6.1.	Reducción y selección de características	69
4.3.6.2.	Análisis exploratorio	70
4.3.7.	Evaluación de modelos de clasificación	70
4.4.	Resultados	72
4.4.1.	Correlaciones entre el rendimiento del juego, la edad y género	72
4.4.2.	Marcadores digitales	72
4.4.2.1.	Inclinación	72
4.4.2.2.	Toque	73
4.4.2.3.	Rendimiento del modelo	75
4.5.	Discusión y conclusión del caso de estudio	76
Capítulo 5.	Conclusiones, aportaciones y trabajo futuro	
5.1.	Discusión y conclusiones	79
5.2.	Limitaciones	82
5.3.	Aportaciones	85
5.4.	Trabajo futuro	86
5.4.1.	Comparación de las características de los patrones vibrotáctiles	86
5.4.2.	Diseño de interfaces hápticas para recolectar nuevas interacciones	87
5.4.3.	Diseño de patrones vibrotáctiles para herramientas terapéuticas	88
5.4.4.	Diseño de interfaces hápticas pasivas	88
Literatura citada	90

Lista de figuras

Figura	Página
1. La figura muestra un diagrama de las interfaces hápticas pasivas y activas, así como las características que pueden ser usadas para estimular la piel y un ejemplo de cada tipo de interfaz.	7
2. La figura muestra una representación de una onda vibratoria y sus diferentes características.	8
3. Se muestra un diagrama de la metodología seguida en este trabajo. Está dividida en tres fases las cuales involucran diferentes actividades. Cada una de las fases se siguió para cada caso de estudio.	11
4. La figura fue tomada del trabajo de Oliveira et al., 2021. La figura muestra ejemplos de las imágenes utilizadas durante el estudio. La figura A del lado izquierdo muestra una imagen geométrica en movimiento y del lado izquierdo a un niño. La figura B muestra lo mismo pero del lado contrario a la Figura A	18
5. Capturas de pantalla de los juegos utilizados en el Ipad. El primer juego consistía en repartir comida a los personajes. B) En el segundo juego los niños tenían que colorear un personaje,	20
6. La imagen fue tomada del trabajo de Perochon (et al., 2023) y muestra de manera gráfica las características que fueron extraídas de los datos de interacción de los niños.	22
7. La imagen fue tomada de FeelSleeve (Yannier et al., 2015). En la imagen se puede ver la funda que se le colocó a la tableta. Los niños meten las manos por los guantes para sentir las vibraciones.	23
8. La imagen fue tomada de (Park et al., 2021) y muestra el robot háptico Falcon de Nanovit el cual tiene forma de lápiz óptico.	24
9. La imagen fue tomada del trabajo de (Dray et al., 2020). La imagen muestra como el papel se coloca sobre la tableta y se puede usar un lápiz tradicional para seguir las animaciones proporcionadas por el sistema.	26
10. La imagen fue tomada del trabajo de Krichmar (et al., 2018) muestra el robot CARBO el cual cuenta con un conjunto de bolas de seguimiento y un arreglo de luces LED. . . .	26
11. Imagen tomada del trabajo de I (Zhao et al., 2018) donde se muestra la pinza háptica que se diseñó, la cual se coloca en el robot y los niños pueden usarla para realizar movimientos	28
12. Niños realizando las actividades de BendableSound. Una niña coloreando la superficie (arriba a la izquierda). Un niño empujando al astronauta (arriba-derecha). Una niña deslizando un cohete (abajo a la izquierda). Un niño empujando la estrella (abajo-derecha).	34
13. La imagen muestra la configuración de BendableSound. Del lado izquierdo se muestra la tela spandex colocada en un marco de PVC y detrás los componentes conectados: El proyector, la pc, el kinect y la bocina.	35
14. Diagrama de emplazamiento de MúsicaFlexible mostrando los componentes de software y el hardware del Sistema.	35

Figura	Página
15. La figura muestra los resultados del total de interacciones táctiles generadas por los participantes. Para cada participante se muestra un diagrama de caja que representa las interacciones táctiles que realizó. El eje-x representa a cada uno de los participantes y el eje-y la cantidad total de interacciones táctiles.	38
16. La figura muestra el total de empujes y deslizamientos que se recolectan por participante. Del lado izquierdo se muestra una gráfica de cajas para cada participante donde se muestra la cantidad de empujes que realizaron durante las 8 sesiones. El lado derecho muestra una gráfica de cajas para cada participante donde se muestra la cantidad de deslizamientos que realizaron durante las 8 sesiones	39
17. La figura muestra una gráfica de cajas que representa la duración de los gestos de cada participante. El eje-x representa a cada uno de los participantes y el eje-y la cantidad total de interacciones táctiles.	39
18. La imagen de la izquierda muestra la gráfica 3D de la trayectoria de una interacción táctil. Para cada punto de la gráfica, guardamos, su ubicación, marca de tiempo, profundidad, cuadro delimitador, y el punto más cercano/lejano a la cámara. La imagen de la derecha, muestra la deformación generada cuando un niño realiza una interacción táctil	42
19. La figura muestra el tamaño, el efecto para cada característica, el asterisco en la parte superior indica el nivel de significancia. $*p < 0.05$; $**p < 0.01$; $***p < 0.001$; $*4 : p < 0.00001$;	48
20. La figura muestra una gráfica de lluvia para cada una de las características, el eje-x representa al grupo de niños y el eje-y el valor de cada característica.	51
21. La figura muestra una gráfica ROC para el mejor resultado de cada uno de los conjuntos de datos	53
22. La figura presenta cinco capturas de pantalla que muestran las principales características de Feel and Touch. 1) Construir la telaraña: esta actividad presenta una araña en el centro de la pantalla y líneas de colores que representan la telaraña que se está construyendo. 2) Recompensas: esta captura de pantalla representa tres cofres del tesoro alineados verticalmente, lo que permite a los niños elegir uno para recoger una recompensa sorpresa que hay en su interior. 3) Alimentar a la araña: esta actividad presenta a la araña en el centro con una línea roja y una representación del movimiento de arrastre necesario para mover las patas de la araña y conseguir uno de los bichos situados al final de la línea roja. 4) Araña disponible. Muestra las arañas recogidas a lo largo del juego como recompensa para que los niños puedan seleccionar su favorita para realizar la última actividad. 5) Bailando en la telaraña: muestra la araña seleccionada en el centro de la pantalla, y los niños pueden tocar o arrastrar la araña; el juego reproduce el patrón vibrotáctil asociado a cada gesto. La Figura muestra un arrastre, la línea azul representa el arrastre, el cuadro naranja representa el cuadro delimitador, la línea amarilla representa el ángulo del cuadro delimitador.	60
23. La figura muestra un diagrama de despliegue donde se muestran los componentes de Feel and Touch	61
24. La figura muestra los resultados del cuestionario de la diversión. Cada barra representa una de las cinco respuestas. Se muestra el porcentaje niños que dieron cada una de las respuestas.	65

Figura	Página
25. La imagen de la izquierda muestra la instalación que usamos durante el estudio. Los participantes se sentaron en una silla para niños y se les pidió que colocaran los brazos sobre la mesa para niños. Utilizamos un Iphone 8 al cual le colocamos un anillo para facilitar el uso.	66
26. La figura muestra una gráfica de lluvia para cada característica. Cada figura muestra a la izquierda una gráfica de distribución de los datos y a la derecha una gráfica de caja, además se muestra la dispersión de los datos con puntos donde cada color representa a un niño.	74
27. La figura muestra el tamaño del efecto de cada característica, los asteriscos en la parte superior el nivel de significancia. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; *4 : $p < 0.00001$;	75
28. . La figura muestra una gráfica ROC donde se comparan los resultados de entrenar el modelo usando todas las características y usar las relevantes.	75

Lista de tablas

Tabla	Página
1. La tabla muestra los diferentes tipos de patrones vibrotáctiles que identificamos en la literatura, una descripción y un ejemplo gráfico.	9
2. La tabla muestra los trabajos relacionados a marcadores digitales del TEA. La tabla describe el tipo de marcador digital estudiado en cada trabajo: Mirada (M), Voz (V), Motricidad (MT), otros (O); La cantidad y tipo de participante y la precisión que se obtuvo al clasificar TEA y NT.	29
3. La tabla muestra los trabajos relacionados al uso de interfaces hápticas para niños, se especifica el área de exploración, el tipo de interfaz háptica, el objetivo y la cantidad de participantes.	30
4. La Tabla muestra los datos demográficos de los niños reclutados para este caso de estudio.	40
5. Datos capturados por la librería TSPS para cada deformación generada por una interacción táctil	42
6. La tabla muestra la cantidad total de interacciones táctiles recolectadas por cada población en cada conjunto de datos.	43
7. La tabla muestra la cantidad de niños por población que contiene cada conjunto de datos que se generaron de manera sintética.	44
8. La tabla muestra las once características base que se extrajeron a partir de las interacciones táctiles de los niños.	47
9. Métricas de evaluación calculadas Verdadero Positivo (TP), Verdadero Negativo (TN), Falso Positivo (FP), Falso Negativo (FN).	48
10. Marcadores digitales identificados en este caso de uso a partir de las interacciones táctiles de los niños. Se describe el marcador digital y las características asociadas a dicho marcador	49
11. La tabla muestra las métricas de rendimiento utilizando validación cruzada de 10 pliegues utilizando el conjunto de datos Original. La letra "T" representa el resultado utilizando todas las características y las letras "MR" representan el resultado utilizando las características más relevantes	52
12. La tabla muestra las métricas de rendimiento utilizando validación cruzada dejando uno fuera utilizando el conjunto de datos Original. La letra "T" representa el resultado utilizando todas las características y las letras "MR" representan el resultado utilizando las características más relevantes	52
13. La tabla muestra las métricas de rendimiento para el mejor modelo obtenido usando validación cruzada de 10 pliegues y dejando uno fuera. Los datos se muestran para cada uno de los conjuntos de datos sintéticos.	53
14. La tabla muestra la cantidad de participantes que participaron en cada sesión de diseño así como el objetivo y resultado de cada una	57
15. La tabla muestra los datos demográficos de los participantes reclutados	66

Tabla	Página	
16.	La tabla muestra un ejemplo de la captura de los gestos, donde el ID indica a qué gesto pertenecen los datos, el tiempo en que se capturó, x,y, las coordenadas del gesto, force, la fuerza que se aplica al realizar un gesto, acX,acY,acZ los valores del acelerómetro en los tres ejes, gX,gY,gZ los valores del giroscopio en los tres ejes y mRadious el área de la pantalla en puntos que se toca con el dedo.	68
17.	Descripción del conjunto de análisis. Se describe el total de participantes de los que provienen las interacciones táctiles. El total de interacciones táctiles para cada grupo y las interacciones táctiles promedio por participante en cada grupo.	69
18.	La tabla describe las características calculadas a partir de los datos de las interacciones táctiles. Las características fueron tomadas de la literatura	71
19.	La tabla describe los marcadores digitales encontrados en este caso de estudio, así como las características asociadas a cada marcador	73
20.	La tabla muestra los resultados de entrenar el modelo con todas las características y usando solo las más relevantes. Se muestra la exactitud (AC), precisión, recall y el valor F1	76

Capítulo 1. Introducción

1.1. Trastorno del Espectro Autista (TEA)

En México el Trastorno del Espectro Autista (TEA) afecta a aproximadamente a uno de cada 115 niños (Fombonne et al., 2016) por lo tanto, explorar las características y desafíos asociados con el TEA es fundamental para promover una mayor conciencia y brindar el apoyo necesario a los niños afectados y a sus familias.

El TEA es una condición que afecta el desarrollo y el comportamiento de una persona (American Psychiatric Association., 2013). De acuerdo al Manual Diagnóstico y Estadístico de los Trastornos Mentales (DSM-V, por sus siglas en inglés *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, Fifth Edition*) una persona con TEA se caracteriza por dos principales características:

- **Deficiencias persistentes en la comunicación e interacción social** Por ejemplo, una persona con TEA puede tener problemas para iniciar o responder a interacciones sociales, presentar anomalías de contacto visual, falta de expresión facial, parece no tener interés en emociones o afectos compartidos, presentar una comunicación verbal y no verbal poco integrada, dificultades para compartir juegos imaginativos o para hacer amigos.
- **Patrones restrictivos y repetitivos** Por ejemplo, una persona con TEA puede presentar movimientos o habla estereotipados o repetitivos, insistencia en la monotonía, excesiva inflexibilidad de rutinas o patrones ritualizados como rituales de saludo o necesidad de tomar el mismo camino. También pueden presentar intereses muy restringidos y fijos, y presentar hiper-o hipo reactividad a los estímulos sensoriales o interés inhabitual por aspectos sensoriales del entorno.

El término espectro se utiliza para indicar que el TEA abarca una amplia gama de manifestaciones, desde síntomas muy leves hasta síntomas más severos. El DSM-V clasifica el TEA en tres niveles de gravedad de acuerdo a la severidad de los síntomas y el nivel de ayuda que necesitan las personas con TEA:

- **Grado 3:** Se considera que las personas en este grado de TEA requieren de apoyo muy significativo; los síntomas son más notorios y severos y afectan notablemente sus actividades de la vida diaria. Por ejemplo, las personas en este grado no suelen hablar y su comportamiento es muy inflexible y repetitivo.

- **Grado 2:** Se considera que las personas en este grado de TEA requieren de apoyo significativo; los síntomas no son tan severos. Las personas en este grado, pueden llegar a iniciar conversaciones para hablar de temas que les interesen;
- **Grado 1:** . Se considera que las personas en este grado requieren apoyo; los síntomas son sutiles. Por ejemplo, las personas en este grado pueden hablar usando oraciones completas y establecer comunicación con otras personas, pero fallan al intentar hacer amigos porque muestran respuestas sociales que se consideran atípicas.

Además de los problemas en la comunicación y socialización que presentan las personas con TEA, se estima que el 80 % de los niños con TEA presentan deficiencias sensomotrices que afectan sus movimientos, el control de fuerza y la sincronización de movimientos, (Coll et al., 2020; Hannant et al., 2016) por lo que se les dificulta realizar tareas como cachar, lanzar, golpear o batear objetos.

También se estima que el 90 % de los niños con TEA presentan dificultades para manejar y responder a la información captada por los sentidos, por ejemplo, los niños con TEA pueden ser demasiado sensibles a la información sensorial, poco sensibles o ambas cosas. (Robertson & Baron-Cohen, 2017).

1.1.1. Problemas sensoriales de los niños con TEA

El procesamiento sensorial es un proceso neurológico que permite dar sentido al mundo que nos rodea, al recibir, registrar, modular, organizar e interpretar la información que llega a nuestro cerebro desde nuestros sentidos. Ayres (1972) identificó siete áreas de procesamiento sensorial: visual, auditivo, táctil, olfativo, gustativo, vestibular y propiocepción.

Existen dos tipos de problemas de procesamiento sensorial y muchos niños con TEA experimentan una mezcla de ambos (Marco et al., 2011); el primer problema es la hipersensibilidad y provoca que los niños eviten la estimulación sensorial porque es demasiado abrumadora; algunos niños son incapaces de tolerar luces brillantes y ruidos fuertes, evitar abrazos y caricias, no saber cuánta fuerza están aplicando, negarse a usar cierto tipo de ropa o tocar ciertas texturas.

El segundo problema es la hipo sensibilidad; en este caso los niños son poco sensibles y buscan más estimulación sensorial; algunos niños tienden a tener una necesidad constante de tocar a personas o texturas, tener una tolerancia extremadamente alta al dolor, y disfrutar los abrazos.

Aunque los problemas sensoriales no son exclusivos del TEA, la prevalencia es mayor en esta población en comparación con otros trastornos del neurodesarrollo (Marco et al., 2011); además, se ha documentado que a partir de los seis meses pueden ser evidentes síntomas de un procesamiento sensorial atípico en niños con TEA (Robertson & Baron-Cohen, 2017).

En particular, se ha observado que aproximadamente el 87 % de los niños con TEA presentan dificultades en el procesamiento táctil (Salki et al., 2022). El procesamiento táctil es el encargado de aportar información sobre lo que estamos tocando, nos ayuda a distinguir texturas, formas, tamaños, y temperatura; este sistema empieza su desarrollo desde la etapa prenatal y es el sistema más grande del cuerpo humano, la literatura ha mostrado que el correcto desarrollo del procesamiento táctil es de suma importancia, ya que permite a los niños conectar con quienes lo rodean, sentir sensaciones a través de la piel y encontrar seguridad en su entorno (Mikkelsen et al., 2018); Asimismo, se ha demostrado que el sistema táctil está fuertemente conectado con otras áreas como la comunicación y la socialización (Khaledi et al., 2022; Foss-Feig et al., 2012).

La literatura ha sugerido que las características sensoriales pueden ayudar a distinguir a niños con TEA de niños con otros trastornos del neurodesarrollo (Baranek et al., 2006; Lord et al., 1994); sin embargo, aún falta investigación para determinar si las características sensoriales son una característica distintiva del TEA (Bizzell et al., 2020).

1.2. Cribado del TEA

En la actualidad se considera que el diagnóstico temprano es la mejor oportunidad para mejorar la calidad de vida de las personas con TEA, (Elder et al., 2017) esto les permite iniciar con intervenciones para mejorar sus habilidades y tener una mejor calidad de vida; sin embargo, esto no es una tarea sencilla. En México se estima que los niños son diagnosticados entre los tres y cinco años de edad (Fombonne et al., 2016) y que la edad de diagnóstico está relacionada con el nivel de TEA, entre más notorios son los síntomas más temprano son diagnosticados los niños (González-Cortés et al., 2019).

Para obtener un diagnóstico, primero los padres deben notar señales de alarma en el desarrollo de sus hijos y compartirlas con un profesional de la salud; después, los profesionales de la salud usan herramientas de cribado para determinar si un niño necesita ser referido a una valoración de TEA.

Una prueba de cribado debe ser rápida y precisa para identificar a los niños que necesitan ser referidos

a una valoración de TEA; sin embargo, diferentes estudios han examinado la eficacia de las pruebas de cribado que existen en la actualidad y han encontrado que la eficacia depende de varios factores, como el contenido de la prueba y el rango de edad (Kanne et al., 2018).

Por ejemplo, aunque en la actualidad existen una gran variedad de pruebas de cribado de TEA, no existe una prueba que comprenda los rangos de edad de los 18 meses a los cinco años de edad. Una de las pruebas de cribado más utilizadas es La lista de verificación de Autismo en niños (M-CHAT por sus siglas en inglés *Modified Checklist for Autism in Toddlers*), esta prueba está diseñada para niños de 16-30 meses de edad y consiste en un cuestionario de 20 preguntas a las que los padres, cuidadores o maestros deben contestar con un sí o no.

El cuestionario incluye preguntas como ¿Su hijo/a se interesa en otros niños?, ¿Cuándo usted sonrío a su hijo/a, él o ella también le sonrío?, etc.; la duración del cuestionario es de aproximadamente 20 minutos. Otras pruebas como el Cociente de Espectro Autista (AQ por sus siglas en inglés *Autism-Spectrum Quotient*) está diseñada para niños de 48 meses a 11 años, por lo que existe una falta de pruebas para niños de entre los 30 y 48 meses de edad y los cuidadores de la salud se ven obligados a seleccionar una prueba ampliando o disminuyendo los rangos de edad, como usar la prueba M-CHAT para niños de 36 meses (Kanne et al., 2018).

La mayoría de las pruebas de cribado de TEA han sido creadas en Inglés por investigadores de Estados Unidos y el Reino Unido, estas pruebas se han traducido en diferentes idiomas, pero no siempre son modificadas para que sean comprendidas por la población destinataria, y los padres pueden encontrar difícil entender las preguntas por las palabras que se utilizan (Jullien, 2021).

Otro aspecto importante a mencionar es que el resultado depende de la persona que esté contestando el cuestionario; por ejemplo, un padre y una madre pueden identificar de manera diferente una sonrisa, las respuestas también pueden estar influenciadas por lo que leen en Internet o la falta de conocimiento de los hitos del desarrollo de los niños (Guinchat et al., 2012).

Aunque la literatura ha mostrado que es relevante monitorear las señales de alarma relacionadas con el procesamiento sensorial, (Micai et al., 2020) la mayoría de las pruebas de cribado del TEA se centran principalmente en las señales de alarma relacionadas con las habilidades sociales y de comunicación.

Además de los desafíos mencionados previamente, en países de América Latina como México, las familias y los niños con TEA se enfrentan diversos obstáculos en la búsqueda de acceso a pruebas de cribado:

- **Falta de seguimiento en el desarrollo de los niños:** Existe una carencia de monitoreo y evaluación del crecimiento, los hitos y las habilidades de los niños a medida que crecen (Hedley et al., 2010; Tuman et al., 2010). En muchos casos, los signos iniciales de TEA pueden no ser inmediatamente evidentes y pueden confundirse con otros comportamientos o etapas normales del desarrollo. Sin embargo, mediante un seguimiento cuidadoso y regular del desarrollo infantil, los profesionales de la salud y los padres pueden notar patrones de comportamiento o dificultades que podrían ser indicativos de un posible TEA y de ser necesario hacer uso de herramientas de cribado.
- **Limitado acceso de los profesionales de la salud a herramientas de detección válidas y confiables:** Los profesionales de la salud a menudo carecen de herramientas efectivas y confiables para llevar a cabo evaluaciones de cribado de TEA (Zuckerman et al., 2015). Cuando los profesionales de la salud carecen de herramientas adecuadas, no pueden identificar y referir a los niños que lo necesitan a servicios especializados y la implementación de intervenciones tempranas.
- **Falta de especialistas.** En México hay una falta de especialistas que pueden aplicar pruebas de cribado o apoyar a los padres que tienen sospechas de TEA en sus hijos, se calcula que en México hay 0.207 psiquiatras y 2.449 psicólogos por cada 100,000 habitantes ¹. Además, dado el extenso territorio de México, los niños que viven en comunidades alejadas a veces tiene que realizar viajes de 6-8 horas para llegar al centro de salud más cercana, lo que disminuye sus posibilidades de ser atendidos y referidos a servicios especializados.

Estas dificultades subrayan la necesidad de contar con pruebas de cribado que sean accesibles, que puedan ser usadas en cualquier momento y lugar, que no dependan exclusivamente de las respuestas de los padres, y que evalúen el procesamiento sensorial. En este contexto, la investigación se ha centrado en demostrar que los marcadores digitales pueden representar una alternativa efectiva para apoyar el cribado del TEA.

1.3. Marcadores digitales

Los marcadores digitales miden datos fisiológicos y de comportamiento de manera objetiva y cuantificable. Generalmente, estos datos se obtienen mediante sensores vestibles, superficies interactivas, sensores móviles y sensores de seguimiento (Meister et al., 2016); existen marcadores digitales que pueden ser más

¹<https://apps.who.int/gho/data/node.main.MHHR?lang=en>

familiares porque son la versión digital de algún marcador existente; por ejemplo, podemos monitorizar la glucosa utilizando un sensor colocado en el cuerpo y transmitir la información a una aplicación; por otro lado, existen marcadores digitales que son más novedosos y que están evolucionando (Coravos et al., 2019).

La literatura alrededor de marcadores digitales de TEA ha demostrado que mediante el uso de estadística inferencial y aprendizaje automático se pueden identificar alteraciones relacionadas con la mirada (Oliveira et al., 2021; Li et al., 2020; Bhatia et al., 2018; Carette et al., 2018; Mahmoudi-Nejad et al., 2017; Falck-Ytter et al., 2013; Nakano et al., 2010; Vargas-Cuentas et al., 2017), la voz (Lyakso et al., 2023; Chaspari et al., 2012; Dai & Keshi, 2007; Deng et al., 2017; Santos et al., 2013) y el movimiento (Ribeiro et al., 2021; Rad & Furlanello, 2017; Crippa et al., 2015; Albinali et al., 2009; Goodwin et al., 2008; Großekathöfer et al., 2017).

La mayoría de estos trabajos ha sugerido colocar sensores en el ambiente o en el cuerpo de los niños, para recolectar datos e identificar marcadores digitales del TEA (ver Capítulo 2). Sin embargo, en los últimos años ha crecido el interés por explorar si las interacciones táctiles pueden ser usadas para revelar marcadores digitales. Las interacciones táctiles son un mecanismo de entrada que permite a los usuarios realizar movimientos con los dedos para interactuar con dispositivos como tabletas, teléfonos inteligentes (Okamoto & Murao, 2021), etc.; las interacciones táctiles, se pueden realizar con un solo dedo (toqué), o con más de un dedo (multi toqué).

Los trabajos enfocados en el uso de interacciones táctiles para identificar marcadores digitales del TEA han mostrado resultados valiosos (Anzulewicz et al., 2016; Perochon et al., 2023); sin embargo, la mayoría de estos trabajos se ha enfocado en el uso de tabletas; dados los problemas sensoriales de los niños con TEA surgen preguntas acerca de la viabilidad de estimular el procesamiento táctil para promover interacciones táctiles e identificar marcadores digitales.

En la actualidad existen herramientas como las interfaces hápticas que pueden ser usadas para estimular el procesamiento táctil y que podrían permitirnos recolectar interacciones táctiles.

1.4. Interfaces hápticas

Las interfaces hápticas se definen como un sistema que modula la interacción táctil entre un humano y el entorno tangible; estas interfaces suelen incorporar componentes mecánicos, sensores, actuadores y

sistemas computacionales que trabajan de manera conjunta para detectar los movimientos de un usuario, procesar rápidamente estas entradas y responder físicamente estimulando el sentido del tacto mediante texturas, patrones vibrotáctiles y otras respuestas táctiles (Kuchenbecker, 2018).

Las interfaces hápticas nos permiten recibir una retroalimentación táctil de forma pasiva o activa (Figura 1). Las interfaces hápticas pasivas estimulan la piel utilizando características espaciales o materiales de los objetos. Por ejemplo, utilizando diferentes texturas, temperaturas, o cambiando su forma para dar la sensación de empujar algo.

Por otro lado, las interfaces hápticas activas estimulan la piel mediante actuadores que simulan propiedades táctiles o cinéticas de un objeto (MacLean, 2000; Kruijff et al., 2019; Rodríguez et al., 2019); por ejemplo, los teléfonos móviles usan motores de vibración para producir patrones vibrotáctiles para darnos información sobre mensajes o llamadas entrantes.

En los últimos años, las interfaces hápticas han sido utilizadas principalmente en el uso de ambientes virtuales para adultos (Wee et al., 2021; Pyun et al., 2022). En el contexto de niños, se ha propuesto el empleo de interfaces hápticas como herramientas terapéuticas y de aprendizaje (ver Capítulo 2); algunos trabajos han encontrado que existen diferencias en como los niños con TEA interactúan con estas interfaces, (Krichmar & Chou, 2018) por lo que existe un potencial para hacer uso de ellas e identificar marcadores digitales del TEA; no obstante, hasta nuestro conocimiento existe poco entendimiento de como usar estas interfaces para estimular el procesamiento táctil, recolectar interacciones táctiles e identificar marcadores digitales del TEA.

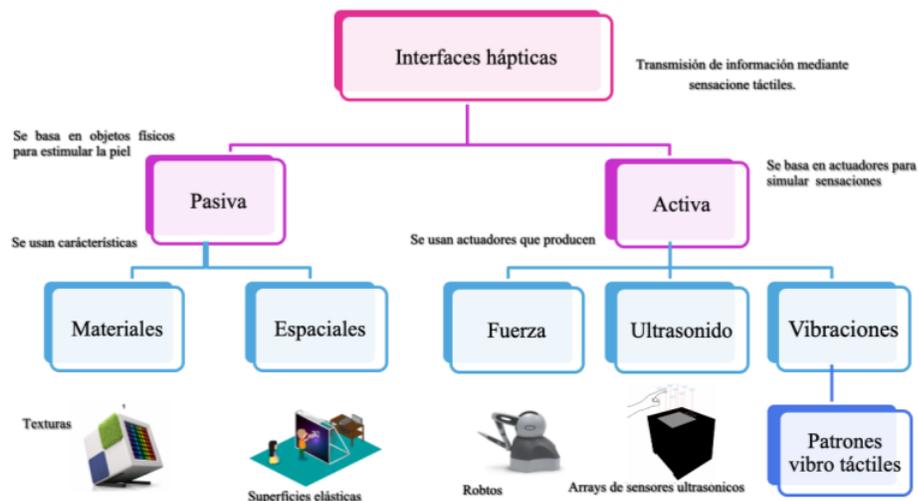


Figura 1. La figura muestra un diagrama de las interfaces hápticas pasivas y activas, así como las características que pueden ser usadas para estimular la piel y un ejemplo de cada tipo de interfaz.

Para enriquecer nuestro conocimiento sobre interfaces hápticas y su utilización para identificar marcadores digitales del TEA, en este trabajo de tesis exploramos ambos casos, en particular exploramos dos interfaces hápticas: una superficie elástica y una interfaz que reproduce patrones vibrotáctiles.

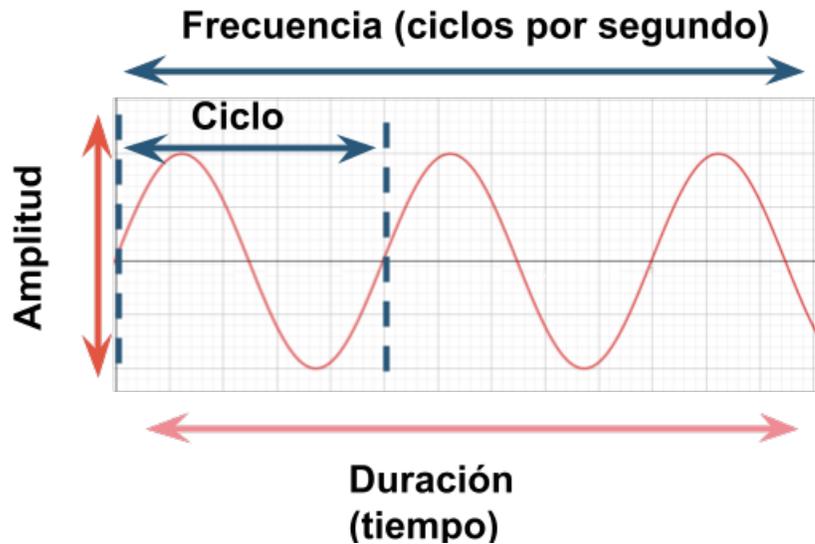


Figura 2. La figura muestra una representación de una onda vibratoria y sus diferentes características.

1.4.1. Patrones vibrotáctiles

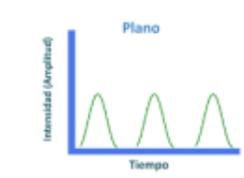
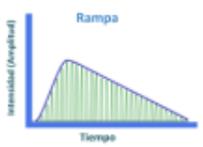
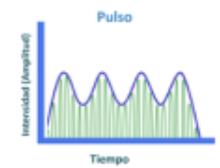
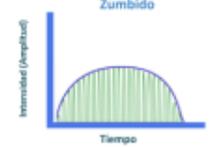
Una vibración produce una onda que se caracteriza por su frecuencia, amplitud (intensidad) y duración (Figura 2). Un patrón vibrotáctil es un conjunto de impulsos (vibración) que puede durar varios segundos y que cuenta con tres características que pueden variar a lo largo del tiempo:

- **Intensidad:** se refiere a que tan fuerte o débil es la vibración, si lo comparamos con la música sería el equivalente al volumen.
- **Ritmo:** es el intervalo de tiempo que existe entre cada vibración.
- **Nitidez;** es la rigidez o dureza con la que se puede sentir una vibración. A mayor nitidez, es más claro para el usuario percibir la vibración.

Los patrones vibrotáctiles se pueden categorizar en función de la forma de onda que generan: planos, rampas, pulsos y zumbidos (ver Tabla 1). En la literatura se ha explorado una amplia variedad de estos patrones vibrotáctiles como metáforas para transmitir información sensorial. Por ejemplo, se han

desarrollado bibliotecas de patrones vibrotáctiles que pueden representar experiencias como la lluvia cayendo, gatos caminando o corriendo, e incluso su ronroneo, entre otros (Israr et al., 2014). Además, se han propuesto patrones vibrotáctiles diseñados para reflejar las emociones expresadas en emoticonos, como la felicidad, la sorpresa, el enojo y la tristeza (Zhang & Ling, 2018; Seifi et al., 2015).

Tabla 1. La tabla muestra los diferentes tipos de patrones vibrotáctiles que identificamos en la literatura, una descripción y un ejemplo gráfico.

Patrón	Descripción	Ejemplo
Planos	La intensidad y nitidez se mantiene igual a lo largo del tiempo.	
Rampas	Varían la intensidad aumentando o disminuyendo, a lo largo del tiempo, hasta alcanzar la intensidad máxima/mínima. La variación de la intensidad a lo largo del tiempo no siempre es lineal, algunos se aceleran rápidamente al principio o al final del efecto. La nitidez se mantiene igual a lo largo del tiempo	
Pulsos	Alcanzan la intensidad máxima más de una vez, la nitidez puede variar a lo largo del tiempo.	
Zumbidos	Patrones suaves y equilibrados. No tienen dirección, son simétricos. La intensidad más alta se alcanza a la mitad del patrón.	

La investigación ha demostrado que los niños con TEA responden de manera diferente a las vibraciones en comparación con los niños nerutípicos (NT) (Puts et al., 2014a), estos resultados han sido obtenidos utilizando herramientas que se construyeron de manera específica para transmitir vibraciones a los dedos; por lo que el acceso a estas herramientas es limitado.

En la actualidad existen dispositivos de fácil acceso que pueden reproducir patrones vibrotáctiles, como los teléfonos móviles; por lo que existe una posibilidad de utilizarlos para reproducir patrones vibrotactiles, promover interacciones táctiles y, al mismo tiempo, identificar marcadores digitales específicos del TEA.

1.4.2. Superficies elásticas

Una superficie elástica se refiere a un tipo de interfaz táctil donde el usuario puede ejercer presión, tracción o estiramiento sobre una membrana flexible para interactuar y crear deformaciones temporales en ella (Troiano et al., 2014).

Estas superficies elásticas ofrecen una retroalimentación háptica inmediata con relación a la fuerza aplicada durante las interacciones táctiles. Hasta la fecha, las aplicaciones de las superficies elásticas se han centrado principalmente en ayudar a los usuarios a comprender conceptos de fuerza y en su uso en terapias musicales (Cibrian et al., 2020).

Sin embargo, es notable que hay una escasa exploración en lo que se refiere a cómo estas superficies elásticas pueden ser aprovechadas para identificar marcadores digitales del TEA.

Dado que los niños con TEA a menudo enfrentan desafíos en el control de la fuerza y en la percepción sensorial, las superficies elásticas podrían ofrecer una oportunidad para descubrir marcadores digitales relacionados con este trastorno. Estas superficies podrían proporcionar un entorno controlado para explorar cómo las interacciones con estas superficies pueden revelar patrones distintivos de los niños con TEA.

1.5. Preguntas de investigación

Dada la problemática, se plantearon las siguientes preguntas de investigación

- **P1** ¿Cuáles son las características de retroalimentación que pueden ser usadas en interfaces hápticas pasivas y activas para potenciar las diferencias entre las interacciones táctiles de niños con TEA y niños neurotípicos?
- **P2** ¿Cuáles son los marcadores digitales del TEA que se pueden identificar mediante la interacción con interfaces hápticas?
- **P3** ¿Es factible desarrollar modelos de aprendizaje automático para la clasificación automatizada de niños con TEA y NT usando interacciones táctiles?

1.6. Objetivo general

Para responder a las preguntas de investigación de esta tesis se planteó el siguiente objetivo general:

Identificar marcadores digitales mediante interfaces hápticas y evaluar su desempeño en la clasificación de interacciones táctiles de niños con TEA.

1.6.1. Objetivos específicos

A partir del objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- **[OBJ 1]** Diseñar interfaces hápticas adecuadas que permitan la ejecución y recolección de interacciones táctiles de niños.
- **[OBJ 2]** Recopilar un conjunto de datos representativo de interacciones táctiles de niños con TEA utilizando las interfaces hápticas diseñadas.
- **[OBJ 3]** Identificar y establecer los marcadores digitales relevantes asociados a las interacciones táctiles de niños con TEA, a partir del conjunto de datos recopilado.
- **[OBJ 4]** Evaluar el desempeño de los marcadores digitales en la clasificación de interacciones táctiles específicas de niños con TEA.

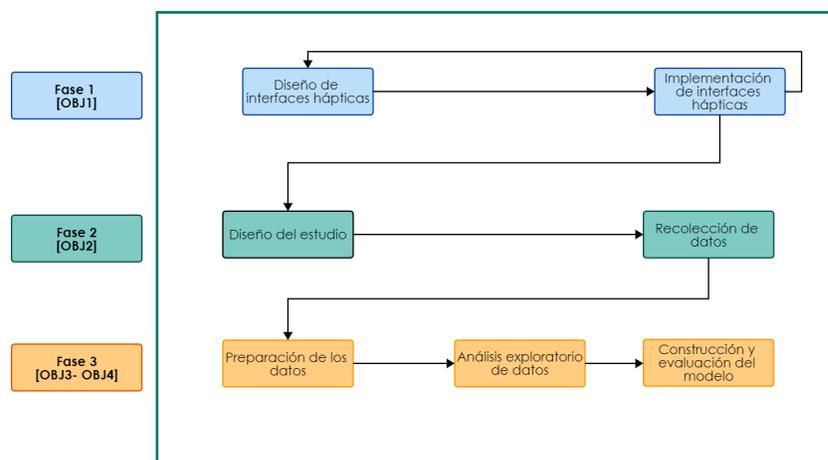


Figura 3. Se muestra un diagrama de la metodología seguida en este trabajo. Está dividida en tres fases las cuales involucran diferentes actividades. Cada una de las fases se siguió para cada caso de estudio.

1.7. Metodología

Con el objetivo de lograr un mayor entendimiento sobre el potencial de las interfaces hápticas en la recopilación de datos de interacciones táctiles y la identificación de marcadores digitales del TEA, esta tesis propusimos la conducción de dos casos de estudio independientes, con dos interfaces hápticas diferentes.

La utilización de dos tipos de interfaces hápticas nos permitió tener una visión más completa de cómo estas interfaces pueden usarse para recolectar interacciones táctiles e identificar marcadores digitales.

Conscientes de las particularidades sensoriales de los niños con TEA y con el fin de evitar una sobre estimulación, optamos por seleccionar una interfaz háptica pasiva en el primer caso de estudio. Posteriormente, para el segundo caso de estudio, utilizamos una interfaz háptica activa.

Para cumplir con los objetivos específicos y responder a las preguntas de investigación planteadas en la tesis, dividimos cada uno de los casos de estudio en tres fases (ver Figura 3).

A continuación, se presenta una descripción detallada de cada una de estas fases.

1.7.1. Fase 1 Diseño e implementación

Esta etapa se centra en el diseño e implementación de cada una de las interfaces hápticas, realizamos las actividades fundamentales para cumplir con el OBJ1, entre las cuales se encuentran el diseño conceptual, el desarrollo del prototipo, y pruebas y evaluación.

A continuación se detallan las actividades llevadas a cabo en esta fase, las cuales son críticas para el desarrollo exitoso de las interfaces hápticas.

1.7.1.1. Diseño

En esta sub fase realizamos el diseño de las interfaces hápticas utilizando técnicas de diseño centrado en el usuario. Para cada interfaz háptica realizamos sesiones de diseño participativo para definir las

actividades y los estímulos visuales y/o auditivos necesarios para dichas actividades. El resultado más importante de esta sub-fase fue la creación de un prototipo de la interfaz háptica que se utilizó en cada caso de estudio.

1.7.1.2. Implementación

Realizamos la implementación de la interfaz háptica que se había diseñado en la sub fase anterior. Para llevar a cabo esta implementación, seguimos una metodología de diseño de software que se caracterizaba por ser iterativa e incremental. En cada iteración de este proceso, realizamos actividades de análisis, diseño, codificación y pruebas.

Los resultados clave obtenidos en esta sub fase incluyen: (a) La definición de la dinámica de las actividades que se llevarían a cabo a través de la interfaz háptica. Esto implicó establecer cómo los usuarios interactuaron con la interfaz y qué acciones podrían realizar. (b) La creación de un prototipo de alta fidelidad de la interfaz háptica.

Este prototipo se caracterizó por ser muy cercano a la versión final de la interfaz y permitió una visualización más precisa de la interfaz. (c) La implementación de un registro que capturara las interacciones táctiles realizadas por los usuarios.

Esto resultó en la capacidad de rastrear y analizar cómo los usuarios interactúan con la interfaz háptica durante su uso.

1.7.2. Fase 2 Diseño del estudio y recolección de datos

Durante esta fase, nos concentramos en llevar a cabo las actividades indispensables para cumplir con el OBJ2. En este período, nuestro enfoque recae en el diseño específico del estudio para cada caso de uso. Esto implica la definición detallada de las pruebas que serán empleadas para evaluar a los niños, así como la especificación del tipo de datos que se recolectarán en cada caso de estudio.

A continuación, se presenta de manera detallada cada una de las actividades que componen esta fase, con el objetivo de ofrecer una visión detallada del proceso en cuestión.

1.7.2.1. Diseño del estudio

Esta sub fase se centró en la preparación y planificación detallada de la conducción de los casos de estudio. Establecimos los criterios de inclusión para la selección de participantes y comenzamos a establecer contacto con las instituciones potenciales donde reclutamos a dichos participantes. Además, definimos los instrumentos que se emplearían para evaluar el desarrollo de los niños, como pruebas psicomotoras y psicológicas.

También especificamos el tipo de datos a recopilar y establecimos los controles necesarios para garantizar la validez y confiabilidad del estudio. El resultado más importante de esta sub fase es la creación del diseño del estudio, que comprende todas estas decisiones y estrategias de planificación para llevar a cabo la evaluación de manera efectiva.

1.7.2.2. Recolección de datos

En esta sub-fase, procedimos con la recopilación de datos esenciales para el estudio. Los participantes interactuaron con las interfaces hápticas previamente diseñadas, y aplicamos los instrumentos de evaluación correspondientes. Durante este proceso, recolectamos datos específicos relacionados con las interfaces hápticas, así como se capturaron videos y fotografías como complemento visual.

Además de la recopilación de datos objetivos, empleamos instrumentos diseñados para medir la percepción de los participantes sobre las interfaces hápticas. Los logros más destacados de esta etapa son: (a) Un conjunto de datos de interacciones táctiles con interfaces hápticas que proporciona información valiosa sobre el comportamiento y patrones de interacción de los niños. (b) La percepción de los niños sobre el uso de las interfaces hápticas, lo que ayuda a comprender su experiencia con estas tecnologías.

1.7.3. Fase 3 Preparación de los datos, creación y evaluación de modelos de clasificación

Desarrollamos esta fase con el propósito de cumplir con los objetivos específicos OBJ4 y OBJ5 y comprende tres actividades fundamentales.

1.7.3.1. Preparación de los datos

Durante esta etapa, realizamos la preparación de los datos para su posterior análisis. Inicialmente, realizamos una limpieza de los datos con el propósito de identificar valores atípicos y registros incorrectos. Verificamos la integridad de los datos, asegurándonos de que no hubiera duplicados ni errores evidentes, y se establecieron criterios para decidir qué datos incluir y cuáles excluir (Hicks et al., 2019; Serrano et al., 2017).

Posteriormente, realizamos la extracción de características. Además, creamos conjuntos de datos específicos que utilizamos en el análisis estadístico y en la construcción de modelos de aprendizaje automático, como árboles de decisión, máquinas de soporte vectorial y bosques aleatorios.

El resultado obtenido en esta fase se compone de una biblioteca de interacciones táctiles caracterizadas. Esta biblioteca representa de manera completa la forma en que los niños interactúan con una interfaz háptica, y proporciona los datos necesarios para realizar análisis estadísticos detallados y construir modelos de aprendizaje automático que puedan ayudar a comprender y predecir patrones de interacción.

Esta preparación rigurosa de los datos es esencial para garantizar que los análisis posteriores sean confiables y efectivos.

1.7.3.2. Análisis de las características

La literatura ha mostrado que para poder identificar marcadores digitales es importante realizar una reducción de características (Pudjihartono et al., 2022). Para lograr esto existen diversas técnicas de selección de características disponibles, que pueden clasificarse en tres categorías principales: envoltura, filtro e integrados; adicionalmente se pueden realizar ensambles usando los métodos anteriores (Solorio-Fernández et al., 2020; Jovic et al., 2015).

Después de reducir el número de características, realizamos un análisis estadístico y generamos gráficos para visualizar los datos. Esto nos ayudó a identificar patrones en las interacciones táctiles de los niños con TEA que pueden ser potenciales marcadores digitales.

El resultado obtenido en esta sub-fase consta de dos componentes importantes: (a) Conjunto de Mar-

adores Digitales del TEA: (b) Conjunto de Características Relevantes: Se identificaron y seleccionaron las características más relevantes que distinguen a los niños con TEA de los niños NT.

1.7.3.3. Construcción y evaluación de modelos

Para esta etapa, se emplearon enfoques de aprendizaje automático con el propósito de evaluar si las características relacionadas con los marcadores digitales establecidos en la sub fase anterior pueden ser usados para crear un modelo de clasificación.

Se llevaron a cabo procesos de entrenamiento y prueba de diversos modelos de aprendizaje automático. Luego, se realizó una comparación exhaustiva de los resultados obtenidos de estos modelos. Los resultados obtenidos en esta sub fase son los siguientes: (a) La creación de un modelo con la capacidad de distinguir entre la interacción de un niño con TEA y un niño NT.

Capítulo 2. Trabajo previo

En este capítulo se presenta la investigación previa relevante de la literatura de cómputo ubicuo e interacción humana computadora con respecto a: (1) marcadores digitales del TEA; y (2) el uso de interfaces hápticas para apoyar las terapias y aprendizaje de niños.

2.1. Marcadores digitales del TEA

En esta sección se describen los dos enfoques que se han explorado para identificar marcadores digitales del TEA. El primer enfoque implica la utilización de sensores y dispositivos incorporados en el entorno en ambiente. Estos dispositivos son capaces de recopilar datos sobre el comportamiento y las actividades de los niños. El segundo enfoque se centra en las interacciones que los niños tienen con superficies interactivas. Estas superficies pueden ser pantallas táctiles u otras interfaces que permitan la interacción utilizando dedos o manos.

2.1.1. Marcadores digitales basados en sensado de comportamiento

Diferentes investigaciones han explorado el uso de sensores colocados en el ambiente para recolectar datos de niños de manera no invasiva e identificar marcadores digitales del TEA.

En particular, en la literatura se ha sugerido el uso de rastreadores oculares para registrar datos relacionados con la mirada, los cuales son posteriormente analizados mediante técnicas de aprendizaje automático con el fin de identificar marcadores digitales del TEA (Kanhirakadavath & Chandran, 2022; Banire et al., 2021; Oliveira et al., 2021; Yaneva et al., 2020; Wan et al., 2019; Turi et al., 2018; Nakano et al., 2010).

Por ejemplo, Oliviera et al. (2021) encontraron que los niños con TEA tienden a enfocar su mirada en el centro de la imagen, incluso cuando el centro de la imagen está vacío. El equipo de investigación utilizó un rastreador ocular para recolectar datos de la mirada de 76 niños con TEA y 30 niños NT de 3 a 18 años de edad. Los niños tuvieron que ver videos de 6 segundos.

Los investigadores dividieron cada vídeo en dos partes (véase Figura 4): una que mostraba a individuos realizando movimientos naturales (por ejemplo, un niño agitando una mano) y otra que mostraba movimientos geométricos (por ejemplo, el diseño de una figura fractal en movimiento).

A partir de los datos recolectados se extrajeron características relacionadas con la atención visual y posteriormente se construyeron modelos de aprendizaje automático para clasificar a los niños con TEA y NT obteniendo una precisión y un recall del 90% y el 69%, respectivamente. Esta investigación demuestra que es posible descubrir marcadores digitales relacionados con la mirada que son relevantes en el TEA; aunque los resultados muestran una precisión alta al clasificar a los niños con TEA y NT, aún hay un número significativo de niños con TEA que no son identificados, lo que sugiere que hay margen para mejorar la capacidad del modelo para detectar TEA.

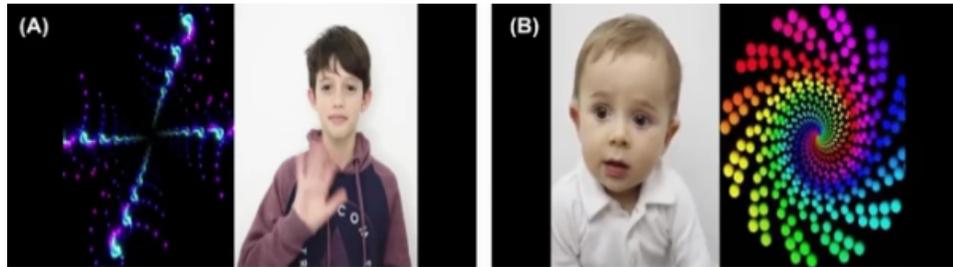


Figura 4. La figura fue tomada del trabajo de Oliveira et al., 2021. La figura muestra ejemplos de las imágenes utilizadas durante el estudio. La figura A del lado izquierdo muestra una imagen geométrica en movimiento y del lado izquierdo a un niño. La figura B muestra lo mismo pero del lado contrario a la Figura A

Por otro lado, se ha planteado la utilización de dispositivos de grabación de voz con el propósito de analizar posibles patrones inusuales en la vocalización de niños con TEA, como cambios en el tono y volumen de su habla (Briend et al., 2023; Lyakso et al., 2023; Talkar et al., 2020; Boorse et al., 2019; Deng et al., 2017; Gong et al., 2018; Santos et al., 2013; Chaspari et al., 2012; Dongxin Xu et al., 2009; Dai & Keshi, 2007).

Por ejemplo, Lyakso et al. (2020), encontraron diferencias significativas en los valores de tono, rango de tono, frecuencia y energía de voz entre niños TEA y NT. El estudio involucró 30 niños con TEA y 30 niños NT entre cinco y 16 años.

Los niños fueron grabados mientras respondían a una serie de preguntas o contaban una historia inspirada en una imagen que se les mostraba. Se extrajeron características relacionadas con la voz y se construyeron modelos de aprendizaje automático, obteniendo una precisión del 60% y un recall del 67% al clasificar a los niños con TEA y NT; lo que significa que el modelo acierta en un 60% de los casos de TEA, pero el modelo no logra identificar aproximadamente el 33% de los casos de niños con TEA; estos resultados sugieren que aún es necesario trabajar en el modelo para mejorar su rendimiento.

Otros trabajos han explorado el uso de cámaras colocadas en el ambiente para estudiar los movimientos

y déficit de coordinación motora de los niños con TEA e identificar marcadores digitales relacionados con el movimiento (Cavallo et al., 2021; Alcañiz Raya et al., 2020; Ardalan et al., 2019; Dawson, 2008; Bidwell et al., 2014).

En esta dirección, Ardalan et al., (2019) encontraron que los niños con TEA presentan mayor variabilidad en sus movimientos cinemáticos que los niños NT y que los movimientos de la cabeza, hombros, pies, y codo izquierdo son los que más ayudan a distinguir a los niños con TEA de los niños NT.

En el estudio participaron 39 niños con TEA y 23 NT niños de siete a 17 años de edad. Se usó una cámara de profundidad (e.g. Kinect) para recolectar datos de movimiento. Los niños tuvieron que completar un juego de balance en el que realizaron 10 posturas estáticas inspiradas en prácticas de Yoga y Tai Chi: grulla, postura del árbol, flexión lateral de pie, bola de energía, y abrazo al árbol. Se calcularon características cinemáticas del movimiento y se construyó un modelo de clasificación que obtuvo una precisión del 75 % y un recall del 100 %; estos resultados sugieren que el modelo no comete errores al identificar niños con TEA.

Estos estudios han demostrado la viabilidad de emplear dispositivos integrados en el entorno para la recolección de datos relacionados con la mirada, la vocalización y el movimiento, con el objetivo de identificar marcadores digitales del TEA. Además, han destacado la importancia de seleccionar características específicas adecuadas para construir modelos de aprendizaje automático capaces de diferenciar entre niños con TEA y niños NT.

A pesar de los resultados prometedores que han emergido de esta línea de investigación, el uso de dispositivos ambientales presenta ciertas limitaciones en cuanto a la interacción de los niños y la configuración/calibración de los dispositivos. Por ejemplo, en el caso de los rastreadores oculares, los niños deben mantenerse dentro del rango de visión del dispositivo, permanecer sentados y enfocados en los estímulos. Además, este tipo de dispositivos puede ser costoso, con precios de hasta \$5000 dólares, lo que podría representar un desafío en países con recursos limitados, como México. La implementación de micrófonos en el ambiente para la grabación de voz implica la necesidad de espacios silenciosos y designados para garantizar datos limpios, libres de interferencias sonoras.

Si bien estos trabajos han realizado contribuciones significativas en el campo de los marcadores digitales del TEA, la mayoría de ellos se ha centrado en explorar comportamientos relacionados con la voz, la atención visual, y movimientos.

Es importante señalar que en la actualidad existen dispositivos más asequibles que podrían utilizarse para

avanzar en esta área de estudio. Por ejemplo, investigaciones recientes han revelado que las interacciones táctiles con tabletas pueden generar información valiosa que podría contribuir a la identificación de marcadores digitales del TEA, como se presenta en la siguiente sección.

2.1.2. Marcadores digitales del autismo basados en interacción

Los trabajos que se han enfocado en identificar marcadores digitales del TEA basados en interacciones han explorado principalmente el uso de superficies interactivas.

Una superficie interactiva es una superficie física (e.g., mesa, piso, celular, tableta) que cuenta con capacidades computacionales (e.g., actuadores y sensores), para procesar múltiples interacciones de toque del usuario a la vez (Grabs, 2009). En estudios previos se ha investigado si la interacción táctil de los niños con tabletas puede revelar marcadores digitales del TEA (Perochon et al., 2023; Lu et al., 2022; Chen et al., 2019; Rafique et al., 2019; Anzulewicz et al., 2016).

Uno de los primeros estudios significativos en esta área fue realizado por Anzulewicz (et al., 2016) quienes propusieron el uso de videojuegos comerciales en Ipad para analizar las interacciones táctiles de niños. En el estudio se contó con la participación de 37 niños con TEA y 45 niños NT quienes jugaron dos videojuegos comerciales en un iPad, cada uno durante un período de 5 minutos (vease Figura 5). Durante estas sesiones de juego se registraron datos provenientes de la pantalla y de los sensores internos de la tableta. Se calcularon 262 características relacionadas con valores cinemáticos (e.g., velocidad, aceleración) y basadas en toques (e.g., cantidad de toques).

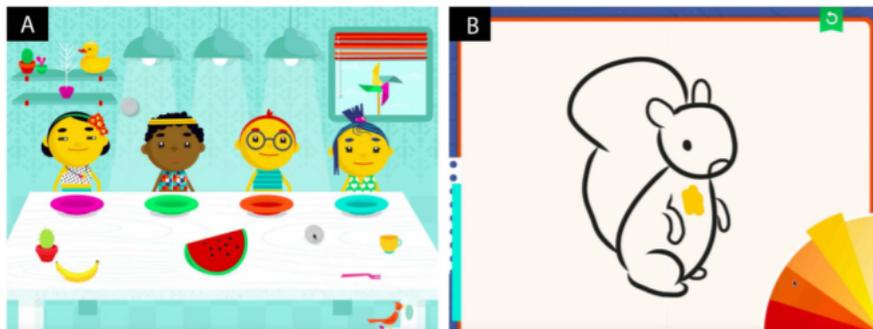


Figura 5. Capturas de pantalla de los juegos utilizados en el Ipad. El primer juego consistía en repartir comida a los personajes. B) En el segundo juego los niños tenían que colorear un personaje,

Se usaron 4 algoritmos de clasificación: Árboles Extra (Extra Trees), Bosques Aleatorios (Random Forest), Bosque regularizado (Regularized Greedy Forest). Los resultados obtenidos en este estudio fueron notables, con una precisión del 93% al clasificar niños con TEA de niños NT. Además, se revelaron diferencias importantes en el comportamiento táctil de los niños con TEA en comparación con los niños NT.

Se encontró que los niños con TEA aplican más fuerza en sus interacciones táctiles, ejecutaban las interacciones táctiles de forma más rápida y utilizaban un área de pantalla mayor para llevar a cabo estas interacciones.

Este estudio proporcionó una visión valiosa sobre cómo las interacciones táctiles pueden servir como marcadores digitales del TEA, subrayando las diferencias en el comportamiento táctil de los niños con TEA y estableciendo así una base para la identificación de marcadores digitales utilizando interacciones táctiles.

En años más recientes, otro estudio relevante en este campo ha sido realizado por Perochon et al. (2023) y su equipo de investigadores, quienes han resaltado el potencial de los juegos móviles basados en interacciones táctiles para identificar marcadores digitales del TEA. Este trabajo se compone de dos estudios, cada uno contribuyendo a un entendimiento más profundo de las interacciones táctiles de los niños con TEA.

En el primer estudio, se involucraron 128 niños neurotípicos y 23 niños con TEA. En el segundo estudio, participaron 19 niños neurotípicos, 31 niños con TEA y 32 niños con TEA y Trastorno por Déficit de Atención e Hiperactividad (TDAH). En ambos estudios, los participantes llevaron a cabo un juego denominado "Explotar Burbujas" en un iPad (véase Figura 6). A partir de estas sesiones de juego, se recolectaron datos relacionados con las interacciones táctiles y se extrajeron características cinemáticas y relacionadas con la interacción en pantalla.

En el primer estudio, se encontraron diferencias notables en las interacciones táctiles de los niños con TEA en comparación con los niños neurotípicos. Los niños con TEA demostraron interacciones táctiles más prolongadas, mientras que los niños neurotípicos requerían menos tiempo para explotar una burbuja.

En el segundo estudio, se revelaron patrones adicionales. Los niños con TEA presentaron una frecuencia de interacciones táctiles más baja en comparación con los niños neurotípicos, y también mostraron un tiempo menor para apuntar a las burbujas. Por otro lado, se observó que los niños con TDAH exhibieron una variabilidad más alta en sus movimientos y una precisión menor en comparación con los niños con

TEA. Estos resultados conjuntos resaltan cómo la interacción táctil en juegos móviles puede proporcionar valiosas pistas sobre los comportamientos motores y las características de los niños con TEA y otros trastornos relacionados.

Estos estudios brindan evidencia concreta de que las interacciones táctiles de los niños con TEA difieren de las de los niños NT, lo que sugiere que estas diferencias pueden servir para revelar marcadores digitales del TEA.

Los resultados de estas investigaciones son alentadores y establecen un nuevo campo de estudio en relación con el uso de interacciones táctiles.

A pesar de estos avances, persisten preguntas sin respuesta con relación a si es factible emplear otros tipos de tecnología para fomentar y estudiar estas interacciones táctiles. Hasta el momento, la mayoría de las investigaciones se han centrado en el uso de tabletas móviles. Sin embargo, a medida que las interfaces hápticas siguen evolucionando, se abre la puerta a la posibilidad de emplear estas tecnologías no solo para promover interacciones táctiles, sino también para brindar retroalimentación y recolectar interacciones táctiles, por ejemplo, se puede retroalimentar la fuerza que se aplica para realizar interacciones táctiles, o utilizar vibraciones para estimular las manos mientras se le pide a los niños realizar interacciones táctiles.

Esto podría ofrecer una valiosa perspectiva para comprender cómo las dificultades en el procesamiento sensorial impactan en las interacciones y, en última instancia, identificar marcadores digitales específicos del TEA.

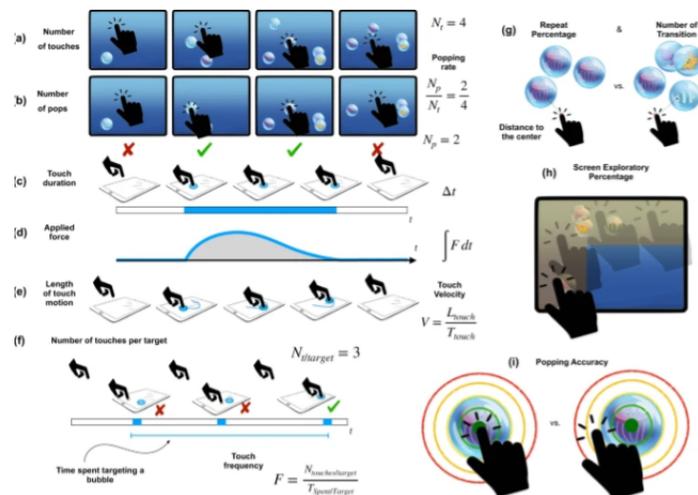


Figura 6. La imagen fue tomada del trabajo de Perochon (et al., 2023) y muestra de manera gráfica las características que fueron extraídas de los datos de interacción de los niños.

2.2. Interfaces hápticas

Las interfaces hápticas han sido extensamente investigadas en ámbitos terapéuticos y educativos destinados a ayudar a los niños. En paralelo, investigaciones recientes han comenzado a explorar la viabilidad de emplear interfaces hápticas para evaluar las habilidades sensoriomotoras de los niños.

2.2.1. Interfaces hápticas como herramientas de aprendizaje

En el ámbito educativo, se ha explorado el potencial de las interfaces hápticas activas para enriquecer el aprendizaje de los niños. En esta línea, se han investigado patrones vibrotáctiles con el propósito de mejorar la experiencia de lectura de los niños, incorporando sensaciones hápticas para enriquecer el contenido de las historias (Yannier et al., 2015) y establecer asociaciones entre sensaciones hápticas y significados semánticos (Zhang et al., 2015).

Por ejemplo, se ha desarrollado una interfaz háptica llamada "FeelSleeve" (Yannier et al., 2015), que consiste en una funda protectora en forma de guante que se coloca sobre una tableta, y cuenta con dos actuadores que generan patrones vibrotáctiles. Estos patrones están asociados a eventos específicos en una historia, permitiendo a los niños sentir lo que están leyendo (ver Figura 7). Un estudio que involucró a 44 niños neurotípicos de edades entre 6 y 9 años demostró que la combinación de los eventos narrativos con los patrones vibrotáctiles en FeelSleeve puede efectivamente mejorar la experiencia de lectura de los niños.



Figura 7. La imagen fue tomada de FeelSleeve (Yannier et al., 2015). En la imagen se puede ver la funda que se le colocó a la tableta. Los niños meten las manos por los guantes para sentir las vibraciones.

Las interfaces hápticas activas han sido empleadas como herramientas para enseñar habilidades de escritura a los niños Park et al. (2021, 2019); Teranishi et al. (2017). Un enfoque en particular ha sido el uso de robots hápticos, como el Falcon de Nanovit, para apoyar el desarrollo de habilidades de escritura mediante retroalimentación háptica.

En un estudio, se involucró a 11 niños con dificultades motoras y 11 niños sin dificultades motoras (Park et al., 2021) . Durante la investigación, los participantes se dividieron en dos grupos: uno empleó únicamente lápiz y papel para las actividades de escritura, mientras que el otro grupo utilizó el robot háptico, el cual tiene forma de lápiz óptico, y proporciona retroalimentación mediante fuerza (ver Figura 8).



Figura 8. La imagen fue tomada de (Park et al., 2021) y muestra el robot háptico Falcon de Nanovit el cual tiene forma de lápiz óptico.

Ambos grupos realizaron un total de 32 tareas de escritura; el grupo que utilizó el robot háptico fue guiado por la retroalimentación generada por el dispositivo para completar las tareas. Los resultados revelaron que los niños que trabajaron con el robot háptico lograron un rendimiento significativamente mejor que el grupo de control que solo utilizó lápiz y papel. Estos hallazgos fueron especialmente notables en tareas de escritura manual que eran visualmente familiares.

Por otro lado, las interfaces hápticas pasivas también han demostrado ser herramientas efectivas para respaldar la adquisición de habilidades de escritura (Guneysu Ozgur et al., 2020). Un ejemplo es el

sistema denominado SpARklingPaper (Drey et al., 2022), que combina una tablet, papel y lápiz para proporcionar retroalimentación tradicional que los niños experimentan al escribir de forma convencional, como la fricción en el papel (ver Figura 9).

SpARklingPaper funciona de la siguiente manera, se coloca una hoja de papel sobre la tableta y los niños pueden utilizar su lápiz preferido para escribir. El sistema guía a los niños durante el proceso de escritura, muestra animaciones y proporciona retroalimentación sobre la exactitud de sus trazos.

Para evaluar la efectividad de SpARklingPaper, se reclutaron 13 niños, quienes usaron el sistema en dos condiciones diferentes: una utilizando un lápiz digital y la otra combinando papel, lápiz y tableta. En particular, se observó que los resultados fueron significativamente mejores en términos de aprendizaje, motivación y percepción cuando los niños utilizaron SpARklingPaper con un lápiz tradicional en comparación con el uso de un lápiz digital. Los resultados muestran que la combinación de la escritura tradicional con la tecnología moderna puede brindar una experiencia de aprendizaje más efectiva y motivadora.

Los hallazgos de estos trabajos destacan la importancia de la combinación háptica en el proceso de aprendizaje. Los trabajos en esta área han mostrado que tanto las interfaces hápticas pasivas como las activas tienen el potencial de mejorar la enseñanza y el aprendizaje de habilidades, escritura y de lectura.

2.2.2. Interfaces hápticas como herramientas terapéuticas

En el ámbito terapéutico, se ha explorado la aplicación de interfaces hápticas, tanto activas como pasivas, para brindar apoyo a los niños en la realización de ejercicios motores, terapias de integración sensorial y enfoques terapéuticos relacionados con las emociones en el contexto del trastorno del TEA (Zeng et al., 2023; Burns et al., 2020; Gao et al., 2018; Krichmar & Chou, 2018; Gabele et al., 2019; Raisamo et al., 2007).

Un ejemplo de interfaz háptica activa es el uso de controles de videojuegos que transmiten patrones vibrotáctiles relacionados con emociones. En un estudio, se equipó un control de videojuegos con 8 actuadores capaces de generar vibraciones, y se llevó a cabo un experimento con 13 participantes para asociar patrones vibrotáctiles con diferentes emociones (Raisamo et al., 2007).

Posteriormente, el control modificado fue evaluado por 9 niños, y los resultados iniciales revelaron una

aceptación positiva de la estimulación táctil. Esta técnica mostró ser útil para el reconocimiento de emociones y para mitigar comportamientos estereotipados.

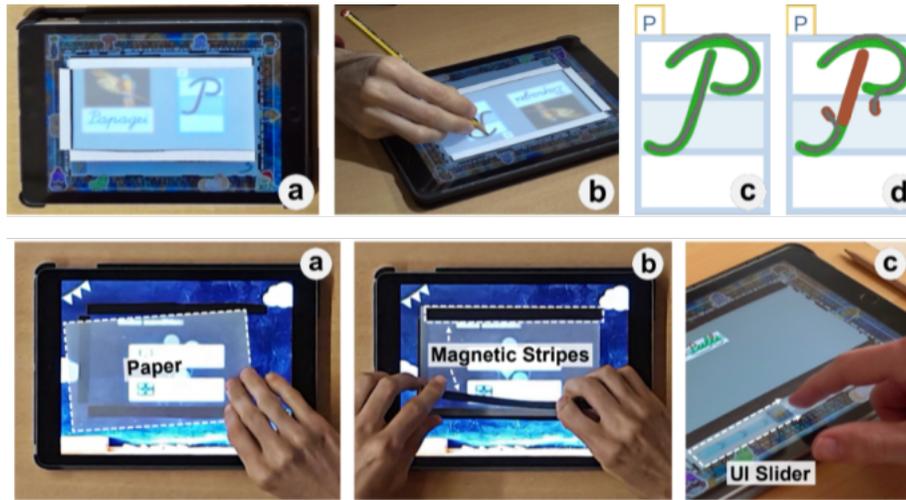


Figura 9. La imagen fue tomada del trabajo de (Dray et al., 2020). La imagen muestra como el papel se coloca sobre la tableta y se puede usar un lápiz tradicional para seguir las animaciones proporcionadas por el sistema.



Figura 10. La imagen fue tomada del trabajo de Krichmar (et al., 2018) muestra el robot CARBO el cual cuenta con un conjunto de bolas de seguimiento y un arreglo de luces LED.

Otro ejemplo de interfaz háptica pasiva es CARBO (Krichmar et al., 2018), un robot háptico diseñado para promover interacciones táctiles a través de un conjunto de juegos interactivos (ver Figura 10). CARBO cuenta con una superficie formada por una disposición de bolas de seguimiento y un conjunto de LEDs en cada una de ellas, junto con sensores táctiles capaces de medir la dirección y el movimiento

de las manos. Un estudio se llevó a cabo con la participación de 19 niños de edades entre 7 y 11 años, diagnosticados con TDAH y TEA.

Los resultados indicaron que todos los participantes pudieron interactuar con CARBO y lo encontraron tanto interesante como intuitivo. Este estudio también resaltó que los patrones de interacción de los niños con TEA difieren de los de los niños con TDAH, lo que destaca el potencial de las interacciones hápticas para identificar diferencias en las formas de interacción de niños con trastornos del neurodesarrollo.

Estos ejemplos ilustran cómo las interfaces hápticas, tanto activas como pasivas, han sido aplicadas en contextos terapéuticos para brindar apoyo a los niños con TEA en áreas que van desde el reconocimiento emocional hasta la mejora de las interacciones motoras y sensoriales. Estas tecnologías ofrecen nuevas vías para personalizar las terapias y mejorar la calidad de vida de los niños con trastornos del neurodesarrollo.

2.2.3. Interfaces hápticas para evaluar habilidades sensomotoras de niños

Desde una perspectiva clínica, la investigación se ha centrado en la exploración del uso de robots hápticos para identificar diferencias en el procesamiento sensorial y el desarrollo de habilidades motoras finas en niños, tanto con TEA como NT (Espenhahn et al., 2022; Koirala et al., 2019; Puts et al., 2014b; McKernan et al., 2020), además de investigar las variaciones en las interacciones de los niños con TEA.

Un ejemplo de ello es el diseño de una pinza háptica utilizada para evaluar habilidades de motricidad fina en un entorno virtual (Zhao et al., 2018). Este sistema puede detectar la posición de la mano y la fuerza de agarre, proporcionando retroalimentación mediante actuadores de fuerza que simulan la resistencia (véase Figura 11). En un estudio de factibilidad, seis niños con TEA y seis niños neurotípicos participaron en actividades de motricidad fina utilizando esta pinza háptica.

Durante la primera actividad, los niños debían trazar una letra siguiendo una línea punteada con un bolígrafo virtual, mientras que en la segunda actividad, debían mover pelotas virtuales a lo largo de un camino, evitando colisiones con las paredes.

Los resultados revelaron que los niños encontraron fácil aprender a usar la pinza háptica, la percibieron como atractiva y, además, mostraron diferencias en la velocidad y la fuerza aplicada entre los niños con TEA y los niños NT.

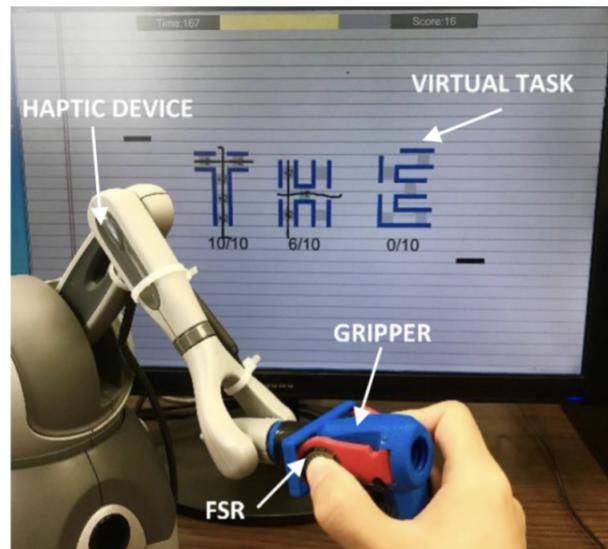


Figura 11. Imagen tomada del trabajo de I (Zhao et al., 2018) donde se muestra la pinza háptica que se diseñó, la cual se coloca en el robot y los niños pueden usarla para realizar movimientos

Otra área de investigación ha buscado evaluar el procesamiento táctil a través de dispositivos donde los niños colocan sus manos y sienten vibraciones en los dedos (Espenhahn et al., 2022; Puts et al., 2014b; McKernan et al., 2020).

Por ejemplo, un estudio reciente realizado por Espenhahn et al. (2020) involucró a 33 niños con TEA y 45 niños NT de 3 a 6 años. Los participantes completaron actividades vibrotáctiles que implican recibir vibraciones de diferentes intensidades en los dedos y responder preguntas sobre su percepción. Los resultados indicaron que los niños con TEA tenían tiempos de respuesta más lentos, pero mostraban una mayor capacidad para discriminar entre los niveles de intensidad de la vibración en comparación con los niños NT.

En conjunto, estos trabajos demuestran que tanto los niños con TEA como los neurotípicos pueden disfrutar y utilizar interfaces hápticas pasivas y activas. Estas interfaces han demostrado ser eficaces como herramientas terapéuticas y de aprendizaje, y también han revelado su potencial como herramientas de evaluación de habilidades. Sin embargo, hasta nuestro conocimiento, el enfoque en el uso de interfaces hápticas pasivas como herramientas de evaluación ha sido limitado. Además, aunque se han detectado diferencias en la interacción entre niños con TEA y NT, hasta nuestro conocimiento las interfaces hápticas han sido poco usadas para fomentar interacciones táctiles y descubrir posibles marcadores digitales. A la luz de esta perspectiva, la hipótesis se orienta hacia la posibilidad de que las interacciones táctiles con interfaces hápticas tengan el potencial de revelar marcadores digitales relacionados con el TEA.

2.3. Resumen

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los estudios relevantes relacionados con la identificación de marcadores digitales del trastorno del TEA que se han presentado en este capítulo. Cada estudio se describe en función del área específica de marcadores digitales que ha sido explorada, los participantes involucrados en la investigación y la precisión lograda en los modelos de clasificación utilizados.

Tabla 2. La tabla muestra los trabajos relacionados a marcadores digitales del TEA. La tabla describe el tipo de marcador digital estudiado en cada trabajo: Mirada (M), Voz (V), Motricidad (MT), otros (O); La cantidad y tipo de participante y la precisión que se obtuvo al clasificar TEA y NT.

		Marcadores digitales				Participantes			Precisión (%)
		M	V	MT	O	TEA	NT	Otros	
Marcadores digitales basados en el sentido de comportamiento									
Dispositivos en el ambiente	Carette et al., 2018	X				18*	18*		95
	Yaneva, 2018	X				18*	18*		75
	Nakano et al., 2010	X				25	25		/
	Hashemi et al., 2012	X				1			/
	Santos et al., 2013		X			20	23		97.7
	Xu et al., 2009		X			34	30		90
	Dongxin et al., 2009		X			34	76	30	90
	Deng et al., 2017		X						/
	Dai & Keshi, 2007		X						/
	Crippa et al., 2015			X		15	15		96.70
	Bidwell et al., 2014				X				93.3%
	Liu, et al., 2016	X				29	29		88.51%
	Vabalas, et al., 2019			X		24*	22*		71%
	Kanhirakadavath et al., 2022	X				219	328		91.38
	Banire et al., 2021	X				20	26		96.5
	Oliveira et al., 2021	X				76	30		93
	Yaneva et al., 2020	X				31	40		74
	Wan et al., 2019	X				37	37		83.8
	Briend et al., 2023		X			38	24		91
	Lyakso et al., 2022		X			95	150		60.2
Boorse et al., 2019					62	40		/	
Cavallo et al., 2021			X		20	20		75	
Alcañiz-Raya et al., 2020			X		24	25		82.98	
Ardalan et al., 2019			X		39	23		89	
Marcadores digitales basados en interacciones									
Superficies interactivas	Vargas-Cuentas et al., 2017	X				8	23		98.5
	Gong et al., 2018		X			18	9	8	/
	Mahmoudi-Nejad et al., 2017				X	5	7		/
	Anzulewicz et al., 2016			X		37	45		93
	Chen et al., 2019					40	51		/
	Perochon et al., 2023	X		X		233	147		74
	Lu et al., 2019			X		37	45		/
	Rafique et al., 2019			X		22	22		91

Al examinar la Tabla 2, se observa una distribución en los enfoques de investigación, donde la mayoría de los trabajos se han concentrado en analizar características vinculadas a la mirada, la voz y los movimientos.

Además, se destaca una proporción más significativa de trabajos que han explorado el enfoque basado en sensores en el entorno en comparación con aquellos que han investigado el enfoque de interacciones hápticas. Sin embargo, es importante destacar que el área de procesamiento sensorial, en particular el procesamiento táctil, ha recibido poca atención, sobre todo si se compara con otras áreas.

Tabla 3. La tabla muestra los trabajos relacionados al uso de interfaces hápticas para niños, se especifica el área de exploración, el tipo de interfaz háptica, el objetivo y la cantidad de participantes.

		Interfaz háptica		Objetivo	Participantes NT (TEA)
		Pasiva	Activa		
Educación	Yannier et al., 2015		X	Lectura	44
	Zhang et al., 2015		X	Lectura	
	Park et al., 2021		X	Escritura	22
	Park et al., 2019		X	Escritura	42
	Teranishi et al., 2018,		X	Escritura	22
	Teranishi et al., 2017		X	Escritura	22
	Dray et al., 2020	X		Escritura	13
	Guneyisu Ozgu et al., 2020	X		Escritura	29
Terapia	Raisamo et al., 2007		X	Emociones	9
	Krichmar et al., 2018	X		Sensorial	26
	Gabele et al., 2019	X		Rehabilitación	/
	Zeng et al., 2023	X	X	Emociones	/
	Burns et al., 2020	X		Habilidades sociales	/
	Gao et al., 2018	X		Sensorial	/
Evaluación	Koirala et al.2019		X	Motricidad	6 (TEA=6)
	Zhao et al., 2018		X	Motricidad	6 (TEA=6)
	Puts et al., 2014		X	Procesamiento táctil	67 (TEA=32)
	Espenhahn et al., 2020		X	Procesamiento táctil	78 (TEA=33)
	McKernan, et al., 2020		X	Procesamiento táctil	50 (TEA=25)

La Tabla 3 ofrece un resumen de los estudios pertinentes relacionados con la utilización de interfaces hápticas en niños. Cada estudio se detalla en términos de si emplea una interfaz háptica pasiva o activa, el número de participantes y el objetivo principal de la investigación. Al observar la tabla, es evidente que la mayoría de los trabajos se han centrado en el uso de interfaces hápticas activas, especialmente en la evaluación de habilidades.

A pesar de que algunos de estos trabajos han identificado diferencias en la interacción entre niños con TEA y niños neurotípicos, es importante señalar que se ha explorado de manera limitada la capacidad de las interfaces hápticas para revelar marcadores digitales específicos del TEA. Esta área emerge como una prometedora línea de investigación. La evidencia presentada sugiere que investigar cómo las interacciones táctiles a través de interfaces hápticas pueden contribuir a descubrir marcadores digitales del TEA es un campo con un gran potencial y que merece mayor atención en futuras investigaciones.

Capítulo 3. Caso de estudio interfaz háptica pasiva

Dado el limitado conocimiento con relación a la utilización de interfaces hápticas para detectar marcadores digitales del TEA, esta tesis exploramos ambos enfoques, tanto el pasivo como el activo. En el primero de los casos de estudio, se abordó el uso de las interfaces hápticas pasivas, permitiendo así un avance hacia el cumplimiento de una parte clave del objetivo general: identificar los marcadores digitales del TEA.

Además, se buscó responder a preguntas cruciales acerca de la viabilidad del diseño y la potencial utilidad de las interfaces hápticas pasivas para recolectar interacciones táctiles que puedan ser usadas para construir modelos de clasificación.

Para este caso de estudio, se desarrolló una interfaz háptica pasiva llamada *BendableSound* (Música Flexible), que se empleó para registrar interacciones táctiles¹ de niños con TEA y niños NT. La recopilación de datos se llevó a cabo en dos contextos diferentes; primero, como parte de una intervención terapéutica que se extendió durante ocho semanas, durante la cual los niños con TEA utilizaron la interfaz háptica pasiva como parte integral de sus actividades escolares; segundo como una actividad extracurricular en la que los niños con TEA y NT participaron de forma voluntaria.

Finalmente, se procedió a la extracción y análisis de características a partir de los datos recolectados, con el objetivo de detectar posibles marcadores del TEA. Estas características fueron utilizadas para construir modelos de clasificación capaces de distinguir las interacciones táctiles de niños con TEA y niños NT².

3.1. Objetivo

Este caso de estudio tiene tres objetivos principales:

- Diseñar una interfaz háptica pasiva para recolectar interacciones táctiles.
- Evaluar si se puede usar una interfaz háptica pasiva para recolectar interacciones táctiles.
- Evaluar si se pueden identificar marcadores digitales del TEA.

¹En este caso de estudio, se definió una interacción táctil como cualquier movimiento de las manos que implica interactuar con la interfaz *BendableSound*. Estas interacciones táctiles abarcan acciones como empujar y deslizar.

²Para la escritura de este capítulo nos apoyamos de la traducción de artículos derivados de esta tesis.

3.2. Interfaz háptica pasiva: BendableSound

BendableSound es una interfaz háptica pasiva que integra una tela de spandex, lo cual permite a los usuarios crear música a través de interacciones táctiles. Cuando los usuarios interactúan con *BendableSound*, la superficie se deforma, se alarga y luego retorna a su forma original, generando así una retroalimentación de la fuerza que utilizan. Las fibras de la tela spandex por sí mismas proporcionan una retroalimentación táctil que genera fricción al ser tocada, constituyendo otra forma de retroalimentación pasiva.

BendableSound tiene un fondo neón animado de nebulosas con elementos espaciales (p. ej., estrellas y planetas) y cuenta con diferentes actividades que desafían a los niños a utilizar variaciones de ritmo y fuerza. Cada interacción táctil produce notas musicales ordenadas en escala ascendente.

BendableSound tiene cuatro actividades con modalidades tanto abiertas como estructuradas. Las actividades abiertas permiten a los niños explorar la superficie libremente, mientras que las estructuradas exigen a los niños a seguir instrucciones predefinidas.

3.2.1. Método de diseño

BendableSound se diseñó siguiendo una metodología de diseño centrado en el usuario. El diseño original de *BendableSound* involucró la participación de psicólogos, músicos, expertos en Interacción Humano Computadora (IHC), niños con TEA, diseñadores gráficos, neuropsicólogos, y padres de niños con TEA. En total se realizaron 12 entrevistas semiestructuradas, 10 sesiones de diseño y 21.5 horas de observación pasiva (Cibrian et al., 2017).

Adicionalmente, a las sesiones del diseño original de *BendableSound* realizamos cinco sesiones de diseño participativo que involucraron a tres expertos en IHC y un experto en aprendizaje automático para reorganizar las actividades, duración e instrucciones originales de *BendableSound*.

Durante el análisis de los datos recopilados de las sesiones de diseño, llevamos a cabo un proceso detallado utilizando técnicas de diseño contextual rápido. A partir de este análisis, se procede a la generación de bocetos, storyboards y nuevas ideas que se integran a las actividades originales.

3.2.2. Diseño e implementación

En las siguientes secciones se describen los resultados del proceso de diseño y la implementación de *BendableSound*

3.2.2.1. Diseño de BendableSound

Como resultado de las sesiones de diseño adicionales de *BendableSound*, se establecieron tres actividades estructuradas y una actividad libre que se describen a continuación:

- **Colorear.** Actividad libre donde los niños realizan interacciones táctiles de tipo empujar o deslizar para colorear la capa que cubre la nebulosa espacial. Esta actividad permite a los niños explorar la superficie de forma libre (Figura 12. arriba-izquierda). Cada vez que los niños tocan la superficie, suena una nota musical dependiendo de donde toquen y aparece un círculo de color que indica donde han tocado. Si el niño ha terminado de colorear toda la superficie antes de la duración preestablecida, el sistema borra automáticamente los círculos de colores para que el niño pueda seguir coloreando. La actividad tiene una duración preestablecida de dos minutos y medio.
- **Empuja el astronauta.** Actividad estructurada donde los niños utilizan la interacción táctil empujar, para hacer que un astronauta se mueva de un lado a otro de la pantalla para atrapar notas musicales. El astronauta se desplaza por la superficie cada vez que el niño toca, siguiendo una secuencia de arriba- derecha, arriba-izquierda, abajo-izquierda, abajo-derecha (Fig. 12 arriba-derecha). Cada que el niño empuja el astronauta, se escucha una nota musical dependiente de la ubicación en la que se encuentre el astronauta. La actividad tiene una duración preestablecida de dos minutos y medio.
- **Desliza la nave.** Actividad estructurada donde los niños utilizan la interacción táctil deslizar para mover un cohete. Los niños deben deslizar un cohete hacia una estrella que aparece en un punto de la superficie, mientras deslizan la nave escuchan notas musicales dependiendo de la posición de la nave. Cuando el cohete toca a la estrella, la estrella desaparece y aparece una nueva en otra ubicación (Figura 12. abajo-izquierda). La actividad tiene una duración preestablecida de dos minutos y medio.

- **Impulsa la estrella.** Actividad estructurada donde los niños utilizan una interacción táctil tipo empuja para tocar una estrella que aparece en un punto de la superficie, los niños escuchan una nota musical dependiendo de la posición de la estrella. Cuando los niños tocan la estrella, la estrella desaparece y aparece en un nuevo punto de la superficie (Fig. 12 abajo-derecha). La actividad tiene una duración preestablecida de 2 minutos y medio.



Figura 12. Niños realizando las actividades de BendableSound. Una niña coloreando la superficie (arriba a la izquierda). Un niño empujando al astronauta (arriba-derecha). Una niña deslizando un cohete (abajo a la izquierda). Un niño empujando la estrella (abajo-derecha).

BendableSound cuenta con dos tipos de instrucciones visuales que el sistema utiliza para llamar la atención de los niños cuando dejan de tocar la superficie. La primera animación son unas manos que se hacen grandes y pequeñas y aparecen si el sistema no detecta alguna interacción en 30 segundos. La segunda instrucción muestra la animación de un niño simulando una interacción de empuje que aparece si después de 60 segundos el niño no ha tocado la superficie.

3.2.2.2. Implementación de BendableSound

BendableSound funciona con una cámara de profundidad, una computadora, un proyector de corto alcance y unas bocinas. Físicamente *BendableSound* mide aproximadamente 1.5m³, consta de un marco de PVC ensamblado de manera similar a una portería de fútbol. El marco sostiene una tela spandex de 1.5 x 2.3m. Detrás de la tela, a 0.5 metros de distancia, se coloca un proyector NEC de proyección

ultracorta, esto nos da un tamaño de proyección de 1.4 x 1.4 m. A 1.78 m de distancia detrás de la tela y a 0.98 m de altura se coloca la cámara de profundidad, para este estudio se utilizó un Kinect 360. Tanto el Kinect como las bocinas y el proyector están conectados a una computadora (Figura 13).

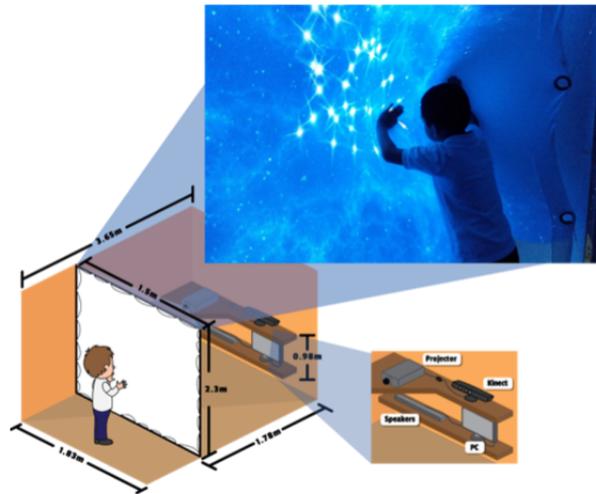


Figura 13. La imagen muestra la configuración de BendableSound. Del lado izquierdo se muestra la tela spandex colocada en un marco de PVC y detrás los componentes conectados: El proyector, la pc, el kinect y la bocina.

BendableSound se implementó utilizando el lenguaje de programación Processing v2.2.15, el cual está basado en JAVA, utilizamos un sombreador (shader) 3D para los efectos visuales de la nebulosa, la API de JavaSound para controlar la reproducción del audio y el sintetizador MIDI, y la librería TSPS³ para detectar las deformaciones que se producen cuando se realizan interacciones táctiles.

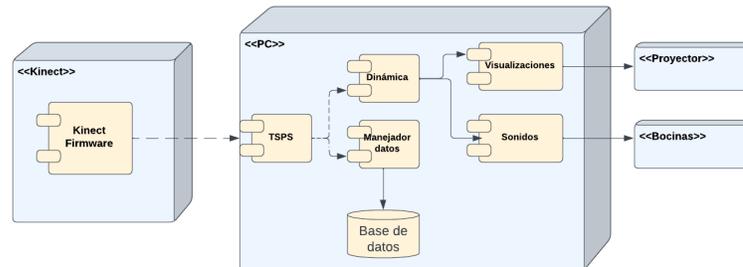


Figura 14. Diagrama de emplazamiento de MúsicaFlexible mostrando los componentes de software y el hardware del Sistema.

TSPS es una librería de algoritmos de visión por computadora para crear aplicaciones interactivas basadas en la interacción natural del usuario. TSPS utiliza un modelo cliente-servidor, donde TSPS es el servidor

³<http://www.tsps.cc/>

que se encarga de obtener el video que el Kinect capta, ejecutar los algoritmos de visión por computadora y enviar los datos al cliente (Processing) para actualizar la dinámica del juego (Figura 14).

3.2.3. Escenario de uso

Javier es un niño de 4 años con TEA quien va a interactuar por primera vez con *BendableSound* su maestra lo acompaña al aula donde está instalado el prototipo.

La maestra le dice a Javier que hoy van a jugar y que necesita que toque con sus manos la tela. La maestra da inicio a las actividades de *BendableSound* y Javier toca con un poco de miedo la pantalla, pero se asombra con los colores y la música que se genera. La maestra le dice a Javier que debe pintar la pantalla usando las manos y lo deja solo.

Javier completa la primera actividad, y sigue con las siguientes actividades: Empuja el astronauta, Desliza la nava, e impulsa la estrella.

Durante la última actividad, Javier deja de tocar, y en la pantalla aparecen unas manos que se hacen pequeñas y grandes, Javier sigue sin tocar y aparece la animación de un niño moviendo las manos. Javier con timidez vuelve a tocar la pantalla y completa todas las actividades.

Javier quiere seguir tocando, pero la maestra le dice que volverán otro día, Javier se va contento del aula.

3.2.4. Evaluación

Antes de iniciar la recolección de datos para identificar los marcadores digitales del TEA, realizamos un estudio para evaluar la eficiencia y capacidad del prototipo, *BendableSound*, para recolectar datos de manera precisa y fiable. Se examinaron aspectos como la calidad de los datos, la facilidad de obtención, la integridad de la información recopilada y la capacidad para capturar patrones relevantes en la interacción; además nos permitió tener un entendimiento inicial de como los niños con TEA interactúan con *BendableSound*.

3.2.4.1. Participantes

Once niños con TEA entre cuatro y ocho años de edad participaron en la evaluación. Los participantes se reclutaron de una escuela-clínica especializada en el cuidado de niños con TEA. Los participantes tenían problemas de atención, eran no verbales, presentaban dificultades sensoriales, cognitivas, diferencias con la coordinación visomotora y la sincronización sensomotora.

Ninguno de los participantes había usado antes *BendableSound*, y no estaban bajo tratamiento farmacológico. Además, contratamos a cuatro terapeutas escolares para que apoyaran a los participantes durante las sesiones con *BendableSound*.

3.2.4.2. Métodos

BendableSound se instaló en el cuarto para terapia de la escuela-clínica. Durante dos meses, los niños completaron ocho sesiones utilizando *BendableSound* (una sesión a la semana) donde completaron las siguientes actividades:

- **Colorear.** Para este estudio, los niños completaron la versión original de esta actividad, la cual consiste en realizar interacciones táctiles tipo empuje o deslizamiento para borrar una capa oscura que cubre una nebulosa (Cibrian et al., 2017). Los niños completan esta actividad cuando han borrado toda la capa oscura. Esta actividad la realizaron los niños al principio y al final de cada sesión.
- **Empuja el astronauta.** Los niños debén empujan un cohete para catapultar su vuelo hacia un planeta. Los niños completaron una cantidad de repeticiones especificada por el terapeuta, cada vuelo del cohete se cuenta como una repetición.

Todas las interacciones táctiles generadas por los niños se registraron de manera automática en un archivo electrónico en una resolución de 60 frames por segundo.

Para cada interacción táctil registramos su ubicación en las coordenadas X,Y, Z y el tiempo en el que fueron realizadas.

3.2.4.3. Análisis de los datos

Para cada interacción táctil calculamos su duración, la coordenada en x,y,z donde inicia y termina, y etiquetamos si una interacción táctil es de tipo empuje o deslizamiento. Analizamos las interacciones táctiles por actividad, por participante y por sesión. Calculamos valores estadísticos como promedio y desviación estándar.

3.2.4.4. Resultados

En general encontramos que los niños con TEA pueden interactuar con *BendableSound* y podemos utilizar esta interfaz háptica pasiva para recolectar interacciones táctiles. Los resultados los dividimos en tres secciones que explicamos a continuación.

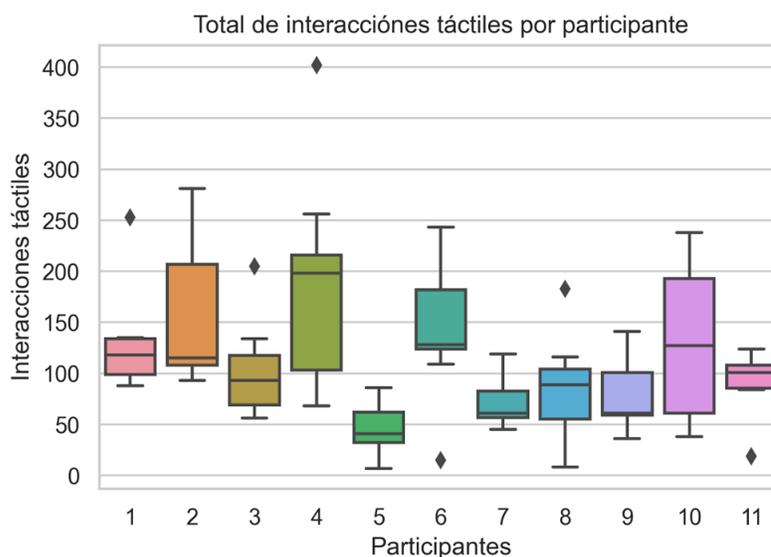


Figura 15. La figura muestra los resultados del total de interacciones táctiles generadas por los participantes. Para cada participante se muestra un diagrama de caja que representa las interacciones táctiles que realizó. El eje-x representa a cada uno de los participantes y el eje-y la cantidad total de interacciones táctiles.

- En total se recolectaron 10504 interacciones táctiles. En promedio, cada niño realizó 954.90 (SD=366.97) interacciones táctiles durante las ocho sesiones. A diario, en promedio, cada niño realizó 110.56 (SD=67.54) interacciones táctiles (Figura 15).
- Tipo de gestos. Los resultados también muestran que los participantes son capaces de realizar los

dos tipos de interacciones táctiles, empuje y deslizamiento. En total recolectamos 2438 interacciones táctiles tipo empuje y 8066 interacciones táctiles tipo deslizamiento. En promedio, cada participante realizó 84 (SD= 125) empujes y 73.39 (SD=114.17) deslizamientos (Figura 16).

- Duración de los gestos. En promedio, los niños realizan interacciones táctiles con una duración de 2 segundos (Figura 17). Los resultados muestran que a partir del cuarto día la duración de las interacciones táctiles disminuyó. Durante el primer día, 50% de los niños realizan gestos con una duración de entre 2 segundos y 4,5 segundos, mientras que durante el último día 50% de los niños realizan gestos con una duración de entre 1 segundo y 2 segundos.

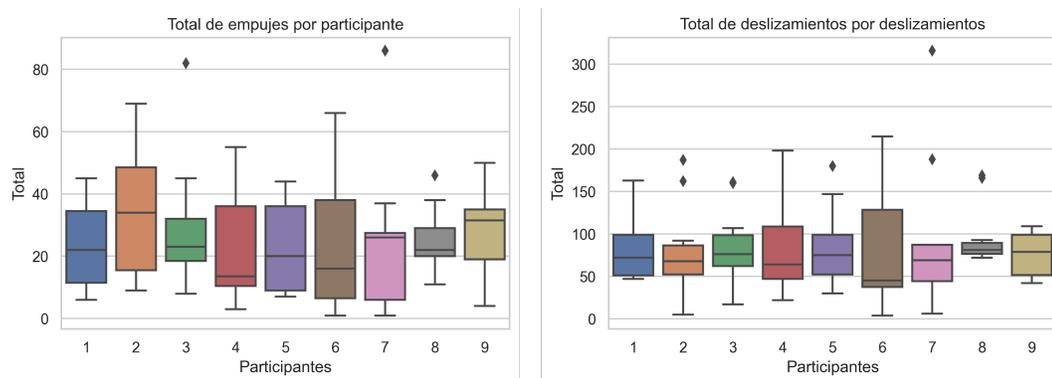


Figura 16. La figura muestra el total de empujes y deslizamientos que se recolectan por participante. Del lado izquierdo se muestra una gráfica de cajas para cada participante donde se muestra la cantidad de empujes que realizaron durante las 8 sesiones. El lado derecho muestra una gráfica de cajas para cada participante donde se muestra la cantidad de deslizamientos que realizaron durante las 8 sesiones.

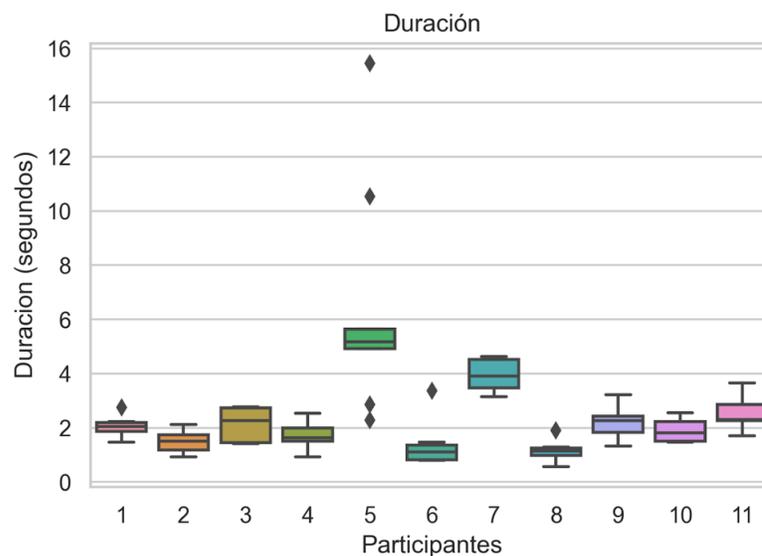


Figura 17. La figura muestra una gráfica de cajas que representa la duración de los gestos de cada participante. El eje-x representa a cada uno de los participantes y el eje-y la cantidad total de interacciones táctiles.

3.3. Captura y caracterización de datos para la identificación de marcadores digitales del TEA

En esta sección describimos los materiales, el procedimiento para recolectar los datos, la preparación y creación de los conjuntos de datos, la selección y extracción de características y la evaluación de modelos de clasificación.

3.3.1. Participantes

Reclutamos 39 niños de un preescolar privado y 22 niños con TEA de tres instituciones diferentes en el norte de México: dos especializadas en el cuidado de niños con TEA y un preescolar privado con un programa de inclusión de niños que requieran atención especial. Todos los participantes tenían entre 3-6 años de edad (Tabla 4).

Para los niños con TEA se tomaron los siguientes criterios de inclusión: tener un diagnóstico basado en la Escala de Observación para el Diagnóstico del Autismo segunda versión (ADOS-2 por sus siglas en inglés, *Autism Diagnostic Observation Schedule, Second Edition*), no estar bajo tratamiento farmacológico y ser capaces de seguir instrucciones.

Tabla 4. La Tabla muestra los datos demográficos de los niños reclutados para este caso de estudio.

	NT	TEA
Masculino/Femenino (N)	19/18	19/3
Edad (años \pm D.E) 3-6 años	4.72 \pm 0.82	4.18 \pm 0.90

Para los niños NT, como criterio de inclusión evaluamos si su puntuación del Inventario de Desarrollo de Batelle (BDI por sus siglas en inglés *Batelle Developmental Inventory*) indicaba que no tenían problemas en su desarrollo motor. De los 39 niños NT, dos presentaron dificultades motoras (DM), estos niños fueron excluidos del conjunto de datos de análisis, y solo fueron usados para evaluar el modelo de clasificación. Adicionalmente, reclutamos a dos psicólogos, quienes fueron los encargados de aplicar la prueba BDI.

Complementamos nuestra recolección de datos con nueve niños con TEA de entre tres a seis años de edad, quienes completaron ocho sesiones con *BendableSound* como parte de un programa terapéutico.

3.3.2. Procedimiento

BendableSound fue instalada en un cuarto privado en cada una de las instituciones. En cada cuarto controlamos la resistencia de la tela, las condiciones de luz, y la distancia entre el Kinect y el proyector. Todos los niños NT pasaron de uno en uno al cuarto privado donde estaba instalado *BendableSound*, los niños con TEA pasaron acompañados de su maestra-psicóloga o maestra sombra, a la cual se le pidió no interferir con la interacción de los niños.

La campaña de recolección de datos se dividió en tres sesiones cada sesión en un día diferente:

- **Evaluación motriz y entrenamiento.** Los psicólogos evaluaron las habilidades motrices de los niños NT utilizando la prueba BDI, la cual involucra que los niños realicen actividades como subir escaleras, caminar sobre un pie, abrir puertas y candados, copiar figuras y letras, recortar entre otras. Los psicólogos observaron a los niños y asignaron una puntuación de cero si el niño no podía realizar la actividad, uno si el niño no podía realizar la actividad, pero lo intentaba y dos si el niño realizaba la actividad correctamente.

Todos los niños asistieron uno por uno a una sesión de entrenamiento para practicar las interacciones táctiles de empujar y deslizar. A cada niño le dimos cinco minutos de tiempo libre para practicar los gestos y sentirse cómodos interactuando con la superficie elástica.

- **Interacción con instrucciones.** En esta sesión todos los niños completaron una sola vez la actividad de Colorear y después completaron tres veces la actividad Empuja el astronauta, en cada repetición de esta actividad le dimos a los niños una instrucción diferente.

La primera vez que completaron la actividad les pedimos que “empujaran el astronauta” (sin decirle el nivel de fuerza); la segunda vez que completaron la actividad le pedimos a los niños que “empujaran fuerte”; la tercera vez que completaron la actividad le pedimos a los niños que “empujaran suave”.

- **Interacción sin instrucciones.** Durante esta sesión todos los niños completaron una sola vez la actividad de Colorear, Deslizar la nave, e Impulsa la estrella. Durante esta sesión no se le dio ninguna instrucción extra a los niños y se permitió que empujaran de acuerdo a la manera en que ellos creían conveniente. El equipo de investigación no dio ninguna instrucción extra que afecta la interacción de los niños.

3.3.3. Recolección de datos

Al finalizar cada actividad, guardamos todas las interacciones táctiles de manera automáticamente en un archivo de valores separados por comas (CSV), a una resolución de 60 frames por segundo; en total, para cada niño se generaron siete archivos CSV. Formalmente, una interacción táctil es la locación de una interacción g_t en un tiempo t : $g_t = X_t\hat{I} + Y_t\hat{J} + Z_t\hat{K}$. Donde X_t, Y_t, Z_t , representan la distancia desde el origen de cada interacción táctil en un tiempo t , en cada dirección; donde I, J, K , son los vectores unitarios en un tiempo t en cada eje.

Para cada punto de una interacción táctil (Figura 18), guardamos las coordenadas (X_t, Y_t, Z_t) , su marca de tiempo, velocidad, y valores de visión por computadora generados por la librería TSPS (ver Tabla 5).

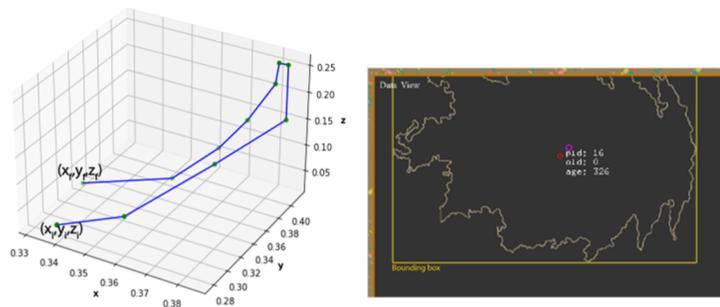


Figura 18. La imagen de la izquierda muestra la gráfica 3D de la trayectoria de una interacción táctil. Para cada punto de la gráfica, guardamos, su ubicación, marca de tiempo, profundidad, cuadro delimitador, y el punto más cercano/lejano a la cámara. La imagen de la derecha, muestra la deformación generada cuando un niño realiza una interacción táctil

Tabla 5. Datos capturados por la librería TSPS para cada deformación generada por una interacción táctil

Dato	Descripción	Valor
Profundidad	Distancia de la interacción táctil a la cámara	Valor normalizado entre (0.0,-1.0)
Cuadro delimitador	Cuadro delimitador alrededor de cada deformación	Dos vectores de dos dimensiones(x,y) que representan el origen y final de cada cuadro delimitado
Centroide	Centro de la deformación	Vector de dos dimensiones (x,y)
Velocidad	Velocidad desde la última actualización	Vector de dos dimensiones (x,y)
Punto más lejano	El punto más lejano a la cámara	Vector de dos dimensiones (x,y)
Puto más cercano	El punto más cercano a la cámara	Vector de dos dimensiones (x,y)

3.3.4. Preparación de los datos

Para limpiar los datos recopilados, dividimos las interacciones táctiles en dos conjuntos de datos (ver Tabla 6), uno para la construcción del modelo (entrenamiento y evaluación) y otro como validación clínica (prueba). Para el conjunto de datos de validación solo se tomaron en cuenta las interacciones táctiles de la actividad Colorear del primer día de los nueve niños que usaron *BendableSound* como parte de una intervención terapéutica. Etiquetamos las interacciones táctiles de los niños DM como NT.

Tabla 6. La tabla muestra la cantidad total de interacciones táctiles recolectadas por cada población en cada conjunto de datos.

Conjunto de datos	Total de interacciones táctiles por población			Tamaño conjunto de datos
	TEA	NT	DM	
Original	7576	13778	0	21354
Validación clínica	611	0	180	791

3.3.4.1. Conjuntos de datos sintéticos

Para balancear el conjunto de datos de Original, usamos la Técnica de sobre muestreo sintético de minorías (SMOTE, por sus siglas en Inglés *Synthetic Minority Oversampling Technique*), la cual se basa en generar, de forma sintética, nuevos elementos de la clase minoritaria usando como referencia los elementos presentes de dicha clase. Para ello, dado un elemento al azar de la clase minoritaria, se escogen sus vecinos más cercanos y se interpolan los datos de los vecinos para generar una nueva instancia.

Este algoritmo solo puede usarse para balancear el conjunto de datos, pero no puede ser usado para aumentar el tamaño del conjunto de datos, por lo que utilizamos la herramienta DataSynthetizer (Ping et al., 2017) la cual toma un conjunto de datos como entrada y genera un conjunto de datos sintético estructural y estadísticamente similar.

Revisamos cada nuevo conjunto de datos y comparamos los histogramas para asegurarnos de que la distribución de los datos sintéticos es similar a la del conjunto de datos original. En total construimos un conjunto de datos balanceado y tres conjuntos de datos sintéticos que se describen a continuación.

- Balanceado.** El conjunto de datos Original presenta un desbalance en la proporción (IR por sus siglas en inglés *Ratio de desbalance*) de 1.68:1; Logramos crear un conjunto de datos balanceado

utilizando SMOTE (ver Tabla 7).

- **Proporción de escuelas.** Este conjunto de datos simula la proporción de niños con TEA y niños NT que se encontraron durante el reclutamiento en el preescolar inclusivo, donde la relación es de cuatro niños con TEA por cada 46 niños NT. Para lograr esta simulación, incrementamos la cantidad de niños NT y mantuvimos constante la cantidad de niños con TEA ($n=22$) (ver Tabla 7).
- **Mediano.** En este conjunto de datos simulamos la presencia de 1000 niños NT. Para mantener un IR de 1.68, incrementamos tanto la cantidad de niños con TEA como la de niños NT (ver Tabla 7).
- **Grande.** Creamos este conjunto de datos para simular un tamaño 100 veces mayor que el conjunto de datos Original. Para lograrlo, aumentamos tanto los niños con TEA como los niños NT siguiendo el IR de 1.68 (ver Tabla 7).

Tabla 7. La tabla muestra la cantidad de niños por población que contiene cada conjunto de datos que se generaron de manera sintética.

Conjunto de datos sintéticos	Total de niños por población		Tamaño conjunto de datos
	TEA	NT	
Balanceado	37	37	74
Ratio escuela	22	253	275
Mediano	594	1000	1594
Grande	3700	2200	5900

3.3.5. Extracción de características

Para este caso de estudio, para cada secuencia de interacciones táctiles, extrajimos un vector de características que representan la interacción de cada niño.

Definimos once características generales que describen la geometría y la ejecución de las interacciones táctiles: (1) distancia, (2) punto inicial, (3) punto final, (4) área, (5) anchura, (6) altura de la interacción táctil (7) velocidad, (8) aceleración, (9) masa, (10) fuerza, (11) duración, (ver Tabla 8). Para calcular la fuerza que ejerce un niño al realizar una interacción táctil, utilizamos un dinamómetro para estimar la masa que se necesita para empujar la tela. Para realizar la estimación de masa seguimos los siguientes pasos: (1). Usamos un dinamómetro para jalar la tela elástica en diferentes puntos (i.e., cerca de los

bordes de la tela, en el centro). (2) estimamos la relación entre la cantidad de masa dada por el dinamómetro y la profundidad del movimiento de empuje. (3) Inferimos que tanta masa es necesaria para llegar a la máxima profundidad del movimiento de empuje ($\max(z)$).

Adicionalmente, usamos los valores de la librería TSPS como características generales (ver Tabla 5). Para cada característica general calculamos valores estadísticos como promedio, desviación estándar, valor máximo, valor mínimo, para capturar la distribución de cada una de las características.

En total calculamos un vector de 143 características por cada niño. El proceso de extracción de características se realizó utilizando el lenguaje de programación Python.

3.3.6. Análisis de las características

Realizamos un análisis de las características que nos permitió tener una mejor comprensión de los patrones dentro del conjunto de datos, y entender la relación entre las características y la población. El análisis de las características lo dividimos en dos partes: (1) la reducción y selección de características y (2) el análisis exploratorio. En las siguientes secciones se describen cada uno de estos procesos.

3.3.6.1. Reducción y selección de características

Para este caso de estudio utilizamos el algoritmo de Boruta (Kursa & Rudnicki, 2010), el cual es un algoritmo envolvente de selección de características que de forma predeterminada utiliza Árboles Aleatorios.

Boruta realiza una búsqueda descendente de las características más importantes al comparar la importancia de las características originales con la importancia que se puede lograr al azar; utiliza copias permutadas y va eliminando progresivamente las características irrelevantes.

Boruta usa un p-valor del 0.01 para confirmar cuándo una característica es estadísticamente importante o no.

3.3.6.2. Análisis exploratorio

El análisis exploratorio de los datos involucra el uso de pruebas estadísticas y métodos gráficos que nos permiten visualizar el conjunto de datos.

Para cada característica seleccionada en la fase anterior utilizamos pruebas de distribución normal como Shapiro Test; evaluamos las diferencias entre niños con TEA y NT mediante una prueba de T-test de dos colas; Posteriormente, realizamos una correlación de bonferroni; fijamos la significación en el nivel 0.5. Calculamos el tamaño del efecto (d) con la prueba D de Cohen entre niños con TEA y NT. Generamos gráficas de nubes de lluvia para tener un mejor entendimiento de los datos y por último, analizamos las características más relevantes y las agrupamos de manera manual para definir los marcadores digitales.

3.3.7. Evacuación de modelos de clasificación

Definimos una tarea de clasificación binaria para distinguir la interacción táctil de niños con TEA de niños NT. Utilizamos el conjunto de datos de Original para entrenar y evaluar diferentes modelos de aprendizaje de máquina: Árboles de decisión, Bosques Aleatorios y Máquinas de Soporte Vectorial (SVM).

Entrenamos los modelos usando el conjunto de características seleccionadas por Boruta y usando todas las características. Para el entrenamiento y prueba de los modelos utilizamos el software Orange (Demšar et al., 2013), una herramienta para realizar minería de datos de análisis predictivo, el cual consta de una serie de componentes que implementan algoritmos de minería de datos, así como operaciones de procesamiento y representación gráfica de datos.

Para comparar el rendimiento de los modelos seccionamos métricos estándares (ver Tabla 9): Precisión, Recall (Exhaustividad), puntuación F (F1), Área debajo de la curva (AUC, por sus siglas en inglés *Area Under the curve*), y Exactitud de la Clasificación (CA por sus siglas en inglés *Classification Accuracy*).

Dado que nuestro problema pretende identificar las interacciones táctiles de niños con TEA y que nuestro conjunto de datos está desbalanceado, las métricas en las que más nos enfocamos para comparar los modelos fueron la precisión y el recall.

Tabla 8. La tabla muestra las once características base que se extrajeron a partir de las interacciones táctiles de los niños.

Nombre	Descripción	Fórmula
Distancia(d)	La distancia es la estimación de la longitud de la trayectoria dibujada en el espacio de un movimiento de empuje.	$d = \sum_{t=1}^{N-1} \sqrt{(x_{t+1} - x_t)^2 + (y_{t+1} - y_t)^2 + (z_{t+1} - z_t)^2}$
PuntoInicial	Punto en x,y,z de donde comienza el gesto	$x_i = first(x)$
PuntoFinal	Punto en x,y,z de donde termina el gesto	$x_f = last(x)$
Ancho Gesto(wg)	Ancho del rectángulo que enmarca el gesto en pantalla.	$wg = \sqrt{max(x)^2 - min(x)^2}$
Alto Gesto(hg)	Alto del rectángulo que enmarca el gesto en pantalla.	$hg = \sqrt{max(y)^2 - min(y)^2}$
Area	Área del rectángulo que enmarca la deformación del gesto	$Area = recW * recH$
Área Gesto	Área del rectángulo que enmarca el gesto en pantalla.	$AreaGesto = wg * hg$
Velocidad	Para estimar la velocidad, se calcula la distancia entre el tiempo que le toma al usuario realizar un gesto.	$ v^{\rightarrow} = \frac{d}{t_f - t_i}$
Aceleracion	Para la aceleración promedio se calcula el cambio de velocidad que hubo en un gesto durante el tiempo que tomó realizar el gesto.	$ a^{\rightarrow} = \frac{v}{t_f - t_i}$
Masa	Se infiere que tanta masa es necesaria para llegar a la máxima profundidad del movimiento de empuje ($maxz$)	$masa = max(z) * kg$
Fuerza	Para tener la estimación de la fuerza usada al empujar la superficie elástica, se calculó la aceleración a de un movimiento de empuje multiplicando la masa para llegar a la profundidad máxima.	$f = masa * a^{\rightarrow} $
Duración	Duración de un gesto desde la posición inicial a la final	$Duracion = L_{touch} - F_{touch}$

Tabla 9. Métricas de evaluación calculadas Verdadero Positivo (TP), Verdadero Negativo (TN), Falso Positivo (FP), Falso Negativo (FN).

Métrica	Descripción	Fórmula
Área bajo la curva (AUC)	Es el área bajo la curva operativa del receptor. El área mide la discriminación, es decir, la capacidad de la prueba para clasificar correctamente.	$\int_a^b f(x)dx$
Exactitud de la clasificación (CA)	La proporción de ejemplos clasificados correctamente	$CA = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN}$
Precisión	La proporción de verdaderos positivos entre los casos clasificados como positivos.	$Precision = \frac{TP}{TP+FP}$
Recall	La proporción de verdaderos positivos entre todos los casos positivos de los datos.	$Ex = \frac{TP}{TP+FN}$
F1	Media armónica de precisión y recall.	$F1 = 2 * \frac{Precision * Exhaustividad}{Precision + Exhaustividad}$

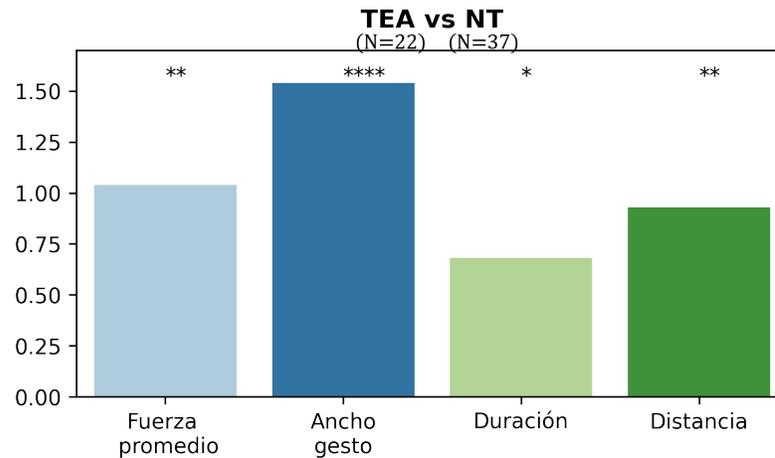


Figura 19. La figura muestra el tamaño, el efecto para cada característica, el asterisco en la parte superior indica el nivel de significancia. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; **** $p < 0.00001$;

Utilizamos la validación cruzada, para obtener una estimación fiable del rendimiento del modelo. En particular, usamos dos técnicas que se describen a continuación:

- (1) **Validación cruzada de 10 pliegues.** Esta técnica divide el conjunto de datos por igual en 10 pliegues con la misma proporción de clases que en el conjunto de datos original. En cada iteración, se selecciona uno de los 10 pliegues como datos de prueba y los 10-1 pliegues restantes se seleccionan como datos de entrenamiento.

- (2) **Validación cruzada dejando uno fuera.** Este enfoque evita el sobre ajuste y tiene más probabilidades de generalizar a los nuevos datos cuando se dispone de un conjunto de datos reducido. Este método inicia empleando como conjunto de entrenamiento todas las muestras disponibles, excepto una, que se excluye para emplearla como validación.

Posteriormente, utilizamos el conjunto de datos de *Validación Clínica* para evaluar el rendimiento del modelo generado al clasificar datos de niños que nunca han visto.

3.4. Resultados

Dividimos los resultados en dos secciones: (1) Marcadores digitales, que describen los resultados estadísticos de las características extraídas, y (2) Rendimiento de la clasificación táctil, que describe el rendimiento de los modelos creados para clasificar las interacciones táctiles de niños con TEA y niños NT.

3.4.1. Marcadores digitales

El análisis de los datos muestra que existen diferencias entre los niños con TEA (N=22) y los niños NT (N=37) al interactuar con una interfaz háptica pasiva. La Tabla 10, muestra la relación entre los marcadores digitales que identificamos y las características que están asociados a ellos, mientras que la Figura 20 muestra la distribución de cada característica y la Figura 19 el tamaño del efecto de cada una de las características. En general encontramos tres marcadores digitales que distinguen a los niños con TEA.

Tabla 10. Marcadores digitales identificados en este caso de uso a partir de las interacciones táctiles de los niños. Se describe el marcador digital y las características asociadas a dicho marcador

Marcador digital	Descripción	Características
Fuerza aplicada	Mide la fuerza aplicada al realizar interacciones táctiles	1 Fuerza promedio.
Espacio de la interacción táctil	Mide el espacio utilizado para realizar interacciones táctiles	2. Distancia .3 Ancho del gesto.
Tiempo	Mide el tiempo utilizado para realizar interacciones táctiles	4. Duración.

3.4.1.1. Fuerza

Existe una **variación en el uso de la fuerza** que aplican los niños con TEA y los niños NT al interactuar con una interfaz háptica pasiva; La Fuerza (*Fuerza Promedio*) muestran que en promedio los niños con TEA (0.9 ± 0.4) aplican significativamente menos fuerza que los niños NT (0.14 ± 0.4); al rededor del 75 % de los niños con TEA aplican una fuerza menor a 0.10N, mientras que 75 % de los niños NT aplican una fuerza mayor a 0.10N (Figura 20— Fuerza promedio.)

3.4.1.2. Espacio

También encontramos que existe una diferencia significativa entre el **espacio** que recorren los niños con TEA al realizar interacciones táctiles. El ancho de las interacciones táctiles (*Ancho Gesto*) sugiere que en promedio los niños NT (0.26 ± 0.28) realizan interacciones táctiles más amplias que los niños con TEA (0.19 ± 0.21). La figura 20— Ancho Gesto muestra que la mayoría de los niños NT realizan interacciones táctiles con una anchura de entre 0.10cm y 0.14cm mientras que la anchura de las interacciones de los niños con TEA la mayor parte se encuentra entre 0.09cm y 0.11cm.

Por otro lado, la *Distancia* de las interacciones táctiles sugiere que en promedio las interacciones táctiles de los niños con TEA (0.56 ± 0.20) son menos largas que la de los niños NT (0.78 ± 0.25); en la figura 20-Duración, se observa que la distancia de las interacciones de aproximadamente el 75 % de los niños con TEA se encuentran entre 0.4cm 0.7cm, mientras que las interacciones táctiles de los niños NT tienen una distancia de entre 0.7cm y 1.2cm.

3.4.1.3. Tiempo

Por último, encontramos que existen diferencias asociadas al **tiempo** que utilizan los niños con TEA al realizar interacciones táctiles. La *Duración* muestra que en promedio las interacciones táctiles de los niños con TEA (3602.11 ± 1558.54) son más duraderas que la de los niños NT (2801.01 ± 837.62); la Figura 20— Duración muestra que la duración de las interacciones táctiles de los niños NT se encuentran entre 1000ms y 4000ms, mientras que las interacciones de los niños con TEA se encuentran más dispersas, y

el 75 % de las interacciones de los niños con TEA tienen una duración entre 2500ms y 7000ms.

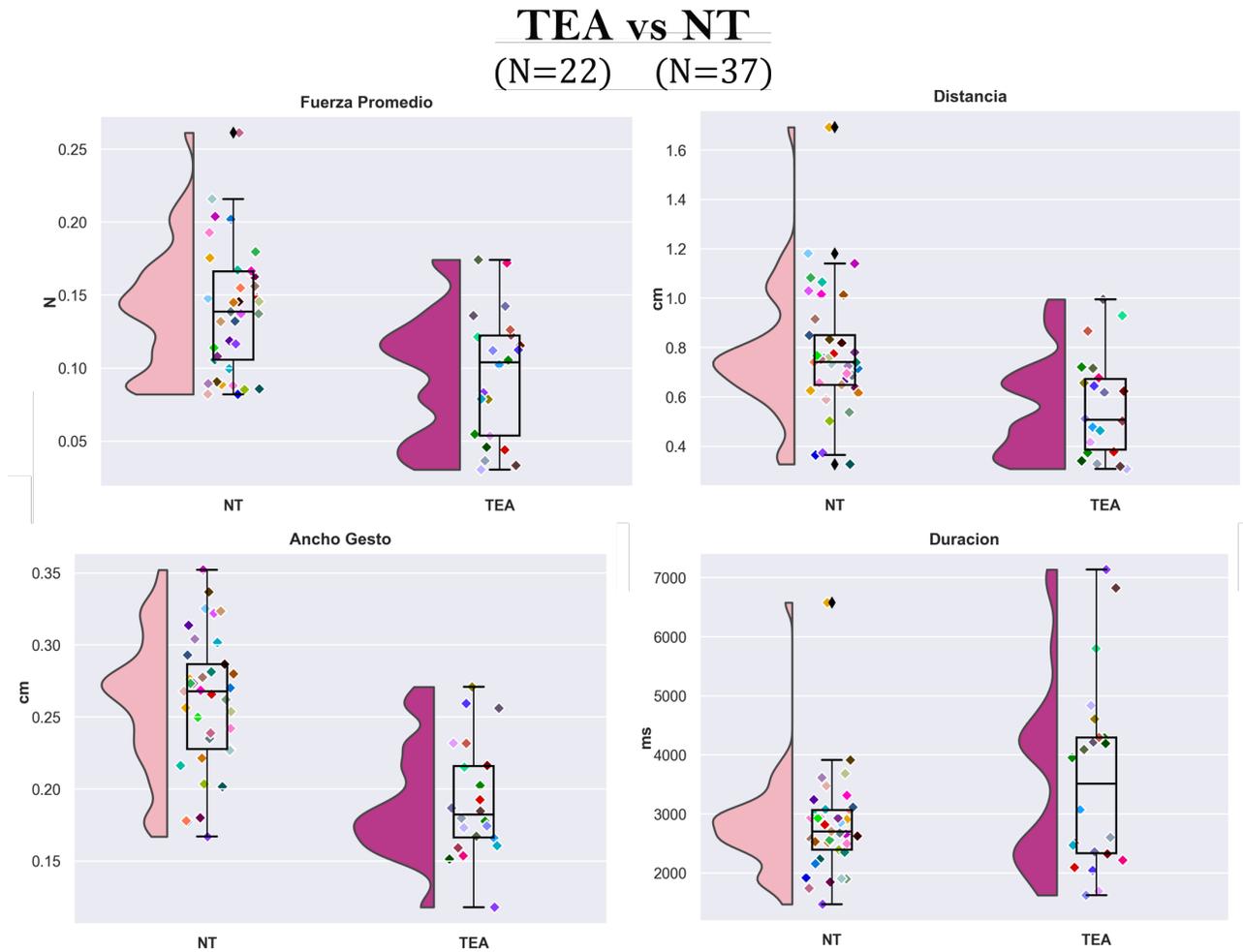


Figura 20. La figura muestra una gráfica de lluvia para cada una de las características, el eje-x representa al grupo de niños y el eje-y el valor de cada característica.

3.4.2. Rendimiento modelo de clasificación sin datos sintéticos

Al construir un modelo utilizando el conjunto de datos Original, los resultados muestran que el modelo con mejor rendimiento fue Bosques aleatorios utilizando el conjunto de las características más relevantes (Tabla 11y 12); el modelo construido con Bosques aleatorios muestra que es capaz de aprender a identificar si la interacción táctil es de un niño con TEA o un niño NT con una precisión y un recall alrededor del 97 % y un valor de AUC de 99 %. Lo que indica que los niños con TEA generan un patrón de interacción que los separa de los niños NT.

Tabla 11. La tabla muestra las métricas de rendimiento utilizando validación cruzada de 10 pliegues utilizando el conjunto de datos Original. La letra "T" representa el resultado utilizando todas las características y las letras "MR" representan el resultado utilizando las características más relevantes

Método	AUC		CA		F1		Precisión		Recall	
	T	MR	T	MR	T	MR	T	MR	T	MR
Árbol de decisión	0.92	0.98	0.93	0.94	0.94	0.96	0.94	0.92	0.94	1
SVM	0.95	0.99	0.84	0.93	0.88	0.94	0.86	0.92	0.89	0.97
Bosques aleatorios	0.97	1	0.94	0.96	0.95	0.97	0.97	0.97	0.94	0.97

Tabla 12. La tabla muestra las métricas de rendimiento utilizando validación cruzada dejando uno fuera utilizando el conjunto de datos Original. La letra "T" representa el resultado utilizando todas las características y las letras "MR" representan el resultado utilizando las características más relevantes

Modelo	AUC		CA		F1		Precisión		Recall	
	T	MR	T	MR	T	MR	T	MR	T	MR
Árbol de decisión	0.92	0.98	0.88	0.94	0.90	0.96	0.89	0.92	0.91	1
SVM	0.94	0.97	0.89	0.91	0.92	0.93	0.89	0.90	0.94	0.97
Bosques aleatorios	0.98	0.99	0.93	0.96	0.94	0.97	0.94	0.97	0.94	0.97

En general, este resultado muestra que es posible construir un modelo robusto para clasificar las interacciones táctiles de niños con TEA, sin importar el tamaño del conjunto de datos y el desbalance que puede presentar. Aunque se tienen más casos de niños NT el modelo no está sesgado hacia esta clase y muestra un buen rendimiento al clasificar a los niños con TEA.

3.4.2.1. Validación del modelo

El modelo generado con Bosques aleatorios y el conjunto de datos Original muestra que es capaz de identificar correctamente la interacción de niños con TEA con un valor de AUC de 88%; el modelo clasificó correctamente a los 9 niños con TEA que completaron la actividad Colorear como parte de la intervención terapéutica.

Los dos niños con puntaje bajo en la prueba BDI fueron clasificados como TEA, lo que indica que la interacción de estos niños es más parecida a la interacción de los niños con TEA que a los niños NT; en un escenario real, estos dos niños serían referidos a un especialista para una evaluación más profunda sobre su desarrollo.

3.4.2.2. Rendimiento modelo de clasificación con datos sintéticos

Tabla 13. La tabla muestra las métricas de rendimiento para el mejor modelo obtenido usando validación cruzada de 10 pliegues y dejando uno fuera. Los datos se muestran para cada uno de los conjuntos de datos sintéticos.

Conjunto de datos	Validación	Modelo	AUC	CA	F1	Precisión	Exhaustividad
Balanceado	10 pliegues	Árbol	0.986	0.986	0.986	0.986	0.986
	Uno fuera	SVM	0.994	0.945	0.945	0.945	0.945
Ratio escuela	10 pliegues	Bosques A.	0.996	0.988	0.988	0.988	0.988
	Uno fuera	Bosques A	?	0.988	0.930	0.952	0.909
Mediano	10 pliegues	Bosques A.	1	0.997	0.997	0.997	0.997
	Uno fuera	Bosques A.	1	0.996	0.996	0.996	0.996
Grande	10 pliegues	Bosques A.	1	0.999	0.999	0.999	0.999
	Uno fuera	Bosques A.	1	0.999	0.999	0.999	0.999

En general, los resultados muestran que al utilizar datos sintéticos se obtienen resultados similares al conjunto de datos Original (Figura 21); En todos los conjuntos de datos la precisión y el recall se encuentran entre el 94 % y el 99 % (Tabla 7). Los resultados muestran que al utilizar el conjunto de datos mediano y el grande se puede alcanzar un AUC igual a uno (Figura 21). Lo que sugiere que sin importar el tamaño del conjunto de datos y si está o no desbalanceado, se puede construir un modelo capaz de identificar las interacciones táctiles de los niños con TEA.

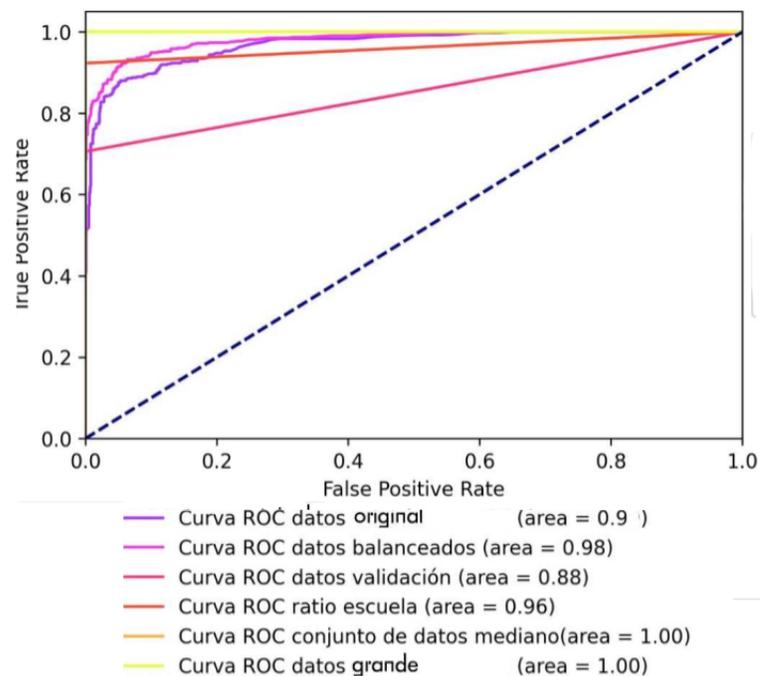


Figura 21. La figura muestra una gráfica ROC para el mejor resultado de cada uno de los conjuntos de datos

3.5. Discusión y conclusión caso de estudio

Este caso de estudio muestra la viabilidad de usar una interfaz háptica pasiva para recolectar interacciones táctiles e identificar marcadores digitales asociados al TEA. Nuestros resultados muestran que los niños con TEA producen un patrón de interacción que los distingue de los niños NT al interactuar con una interfaz háptica pasiva. En este caso de estudio encontramos tres potenciales marcadores digitales del TEA: (1) variación en el uso de la fuerza; (2) espacio utilizado; (3) tiempo.

De estos tres marcadores digitales, existe otro trabajo (Anzulewicz et al., 2016) que ha propuesto utilizar la fuerza como marcador digital del TEA; sin embargo, nuestros resultados muestran un comportamiento contrario. Este resultado podría estar asociado a los problemas de control de fuerza que tienen los niños con TEA, además durante el estudio observamos que los niños NT tomaban impulso para poder empujar más fuerte mientras que los niños con TEA se movían menos.

Este resultado también podría estar influenciado por el tipo de superficie, nosotros usamos una interfaz háptica pasiva que da una retroalimentación espacial cuando los niños empujan, mientras que en el trabajo de Anzulewicz utilizan una superficie rígida. Al ser *BendableSound* una interfaz nueva y los problemas sensoriales y motrices que presentan los niños con TEA, su interacción pudo verse afectada por la retroalimentación que brinda *BendableSound*. Es necesario realizar más estudios para comprender completamente como la retroalimentación espacial y la textura afectan la interacción de los niños con TEA.

En cuanto a la diferencia en el tamaño de las interacciones táctiles, podría ser consecuencia de la agilidad y movilidad que presentaban los niños NT en comparación con los niños con TEA. Por ejemplo, en la actividad de colorear algunos niños NT se movían para realizar los gestos, lo que pudo generar interacciones táctiles más anchas. En cambio, la mayoría de los niños con TEA permanecían en un mismo lugar, también la retroalimentación pudo afectar al movimiento de los niños, observamos que a los niños con TEA parecía gustarles la textura y se fijaban solo en el punto donde estaba su mano.

En cuanto al tiempo que utilizan los niños con TEA para realizar interacciones táctiles, podría asociarse a que los niños con TEA tocaban por más tiempo la tela, tenían interacciones táctiles más delicadas y prestaban atención a los colores y la textura de la tela, mientras que los niños NT parecían más interesados en ver cómo se movía el astronauta por lo que tocaban más rápido. Otra posible razón de que los niños con TEA hagan interacciones táctiles más duraderas es que dados los problemas motores que presentan, algunos niños con autismo tienden a hacer movimientos más lentos (Ament et al., 2015).

En general, los potenciales marcadores digitales encontrados en este caso de estudio muestran que los problemas de motricidad y sensoriales que presentan los niños con TEA pueden afectar la forma en la que interactúan con una superficie elástica.

Por otro lado, nuestros resultados muestran que las características asociadas a los marcadores digitales pueden ser usadas para construir modelos de aprendizaje automático capaces de clasificar las interacciones de niños con TEA y niños NT.

Usando estas características se pudo alcanzar una precisión y recall arriba del 95 %, los resultados muestran que el desbalance de los datos no afecta el rendimiento del modelo y que no es necesario el uso de datos sintéticos.

En este estudio de caso, hemos aprendido que es posible emplear una interfaz háptica pasiva para recopilar y generar conjuntos de datos relacionados con interacciones táctiles. Estas interacciones pueden ser analizadas con el propósito de identificar marcadores digitales y construir modelos de clasificación.

La interfaz háptica que elegimos para este propósito proporciona dos tipos de retroalimentación, espacio y textura. Los resultados sugieren que esta retroalimentación puede influir en la forma en que los niños con TEA llevan a cabo las interacciones táctiles. Sin embargo, es fundamental llevar a cabo estudios adicionales que comparen diferentes tipos de retroalimentación para comprender completamente su impacto en la interacción de los niños con TEA.

Una desventaja de las interfaces hápticas pasivas es que pueden tener limitaciones en la variedad de retroalimentaciones que pueden ofrecer. Por ejemplo, en el caso de *BendableSound*, sus dimensiones pueden complicar la creación de prototipos con diferentes materiales para variar la retroalimentación. Una solución podría ser la incorporación de actuadores para simular diferentes sensaciones, aunque esto conlleva el riesgo de perder otras características, como la retroalimentación espacial.

Es importante destacar que en la actualidad existen otras interfaces hápticas activas que también pueden utilizarse para identificar marcadores digitales en niños con TEA. De hecho, la literatura ha demostrado que los niños con TEA pueden responder de manera diferente a las interacciones con vibraciones (Puts et al., 2014a). Esto sugiere que existen múltiples enfoques y posibilidades para investigar y desarrollar interfaces hápticas activas que incorporan vibraciones para identificar marcadores digitales del TEA.

Capítulo 4. Caso de estudio interfaz háptica activa

En este segundo estudio de caso, hemos explorado el uso de una interfaz háptica activa con el propósito de responder preguntas sobre el diseño de interfaces hápticas activas y su viabilidad para la recopilación de interacciones táctiles que permitan identificar marcadores digitales del TEA y la construcción de modelos de clasificación.

En este estudio, diseñamos y desarrollamos una interfaz háptica activa para recolectar interacciones táctiles¹ a la cual llamamos *Feel and Touch* (Toca y Siente) que incorpora patrones vibrotáctiles. La recopilación de datos la realizamos en dos instituciones en Puebla.

Finalmente, procedimos a extraer y analizar características específicas con el objetivo de identificar marcadores del TEA. Además, utilizamos estos datos para construir modelos de clasificación que permitiera distinguir las interacciones táctiles realizadas por niños con TEA de las realizadas por niños NT².

4.1. Objetivo

Este caso de estudio tiene dos objetivos principales:

- Diseñar una interfaz háptica activa para recolectar interacciones táctiles.
- Evaluar si se puede usar una interfaz háptica activa para recolectar interacciones táctiles.
- Evaluar si se pueden identificar marcadores digitales del TEA.

4.2. Interfaz háptica activa: *Feel and Touch*

Diseñamos un juego móvil háptico llamado *Feel and Touch* (ver Figura 22). Este juego utiliza patrones vibrotáctiles diseñados para imitar la forma en que las arañas perciben las vibraciones en sus patas. El propósito de *Feel and Touch* es ayudar a una araña a reconstruir su telaraña y capturar insectos. *Feel and Touch* utiliza los patrones vibrotáctiles como pistas para determinar cuándo es apropiado tocar la

¹En este caso, definimos una interacción táctil como cualquier movimiento de los dedos destinado a interactuar con la interfaz *Feel and Touch*. Estas interacciones táctiles pueden manifestarse a través de toques (taps) o deslizamientos.

²Para la escritura de este capítulo nos apoyamos de la traducción de artículos derivados de esta tesis.

pantalla. Cada interacción táctil se encuentra asociada a un patrón vibrotáctil que varía en términos de duración e intensidad.

Específicamente, el juego establece una asociación entre dos tipos de interacciones táctiles: el toque y el arrastrar, y los patrones vibrotáctiles denominados “plano” y “rampa”, respectivamente. *Feel and Touch* presenta dos actividades estructuradas: Construye la telaraña, Alimenta a la araña y una actividad libre Bailando en la telaraña. Conforme los niños avanzan en estas actividades, la complejidad tanto de las interacciones como de los patrones vibrotáctiles aumenta. Por ejemplo, un simple toque resulta más sencillo que un arrastre, lo que contribuye a una progresión gradual en la experiencia de juego.

4.2.1. Métodos de diseño

Tabla 14. La tabla muestra la cantidad de participantes que participaron en cada sesión de diseño así como el objetivo y resultado de cada una

Sesión	Participantes	Objetivo	Resultado
1	4 expertos en IHC 5 niños	Asociar los gestos con un patrón vibrotáctil adecuado.	Lista de gestos asociados con un patrón vibrotáctil que los participantes seleccionaron
2	1 experto en IHC 2 niños 2 maestras de preescolar 1 maestra de educación especial	Diseñar un juego que use patrones vibrotáctiles	Un prototipo de baja fidelidad de un juego que usa patrones vibrotáctiles
3,4,5	3 expertos en IHC	Definir la dinámica del juego	Dinámica del juego
6	1 experto en IHC 1 diseñador gráfico	Obtener el diseño de los gráficos del juego	Diseño del personaje principal, así como del escenario y demás personajes.

Llevamos a cabo una revisión exhaustiva de la literatura con el propósito de recopilar información acerca de las interfaces hápticas existentes, los patrones vibrotáctiles disponibles y las diversas interacciones táctiles que estaban disponibles en ese momento. Para el proceso de diseño, seguimos una metodología centrada en el usuario, para:

- **Seleccionar interacciones táctiles:** Identificamos las interacciones táctiles más adecuadas para nuestra aplicación.
- **Seleccionar las actividades apropiadas:** Elegimos las actividades que mejor se adaptan al contexto de nuestro proyecto.

En total, realizamos tres sesiones de diseño participativo, en las cuales participaron un grupo diverso de expertos en IHC, niños, educadoras de preescolar, docentes de educación especial y diseñadores gráficos, además realizamos tres sesiones con expertos en IHC para definir la dinámica del juego (ver Tabla 14). Los datos obtenidos durante estas sesiones de diseño fueron analizados empleando técnicas de diseño contextual rápido. Posteriormente, plasmamos estos datos en forma de bocetos, storyboards y nuevas ideas que se incorporaron a las actividades iniciales.

4.2.2. Diseño e implementación

4.2.2.1. Patrones vibrotáctiles y gestos

De las sesiones de diseño obtuvimos una lista de gestos asociados a un patrón vibrotáctil, en particular para este estudio seleccionamos dos gestos que los niños de 3 a 5 años pueden realizar (Crescenzi et al., 2029): toqué y arrastrar para los cuales asociamos el patrón plano y en rampa respectivamente, los cuales describimos a continuación:

- **Patrón vibrotáctil plano.** Un patrón vibrotáctil plano se caracteriza porque la intensidad de la vibración se mantiene constante a lo largo del tiempo, y se puede manipular el ritmo de la vibración. Seleccionamos tres ritmos, basándonos en los reportados en la literatura (Ternes & Maclean, 2008; Seifi et al., 2015; Haghghi et al., 2020): (1) Lento. El tiempo entre cada vibración es de un segundo. (2). Medio. El tiempo entre cada vibración es de 500 milisegundos. (3) Rápido. El tiempo entre cada vibración es de 250 milisegundos. En nuestro diseño definimos 25 pulsos para cada patrón vibrotáctil plano siguiendo la cantidad máxima de estímulos reportados en la literatura (Puts et al., 2014a).
- **Patrón vibrotáctil rampa.** Las rampas se caracterizan porque la intensidad de la vibración aumenta/disminuye a lo largo del tiempo. Seleccionamos una rampa ascendente y una rampa descendente.

Definimos un patrón de 25 rampas, cada una con una duración de 2 segundos y 1 segundo de tiempo entre cada rampa.

4.2.2.2. Diseño de Feel and Touch

A partir de las sesiones de diseño, se obtuvieron dos actividades estructuradas y una actividad libre:

- **Construye la telaraña** (Figura 22-1). En esta actividad estructurada, los niños deben seguir el ritmo del patrón vibrotáctil dando toques en cualquier lugar de la pantalla. Al dar un toque, la araña saltará desde su ubicación actual hasta la ubicación del toque, dibujando una línea entre los dos puntos. Esta actividad tiene tres niveles, cada uno con un ritmo diferente de vibración que va de lento a rápido.
- **Alimentar a la araña** (Figura 22-3). En esta actividad estructurada, los niños deben arrastrar las patitas de la araña siguiendo la vibración de una rampa para alimentar a la araña con los bichos que quedan atrapados en la telaraña. La vibración de la rampa se reproduce cada vez que un bicho cae en la tela. La araña se mueve y captura el bicho cuando el niño suelta la patita de la araña. Esta actividad tiene tres niveles, cada uno con un patrón de rampa diferente: rampas ascendentes, rampas descendentes y rampas mixtas.
- **Bailar en la telaraña** (Figura 22-5). Actividad libre donde los niños pueden hacer toques o arrastrar libremente mientras sienten las vibraciones planas o en rampa, respectivamente. La araña saltará cuando los niños toquen y bailará cuando la arrastren.

Feel and Touch reproduce un tutorial antes de jugar y una recompensa después de completar cada nivel del juego. Tanto el tutorial como la recompensa actúan como actividad de relajación entre la estimulación vibrotáctil (Figura 22-2). El juego utiliza indicaciones verbales y visuales. Las verbales incluyen instrucciones grabadas por voz como "Toca la pantalla cuando sientas la vibración" las visuales incluyen puntos de colores que aparecen en la pantalla.

Las instrucciones se dan cuando el niño no toca la pantalla. Al final de cada actividad, el niño desbloquea una nueva araña como recompensa (Figura 22-4).

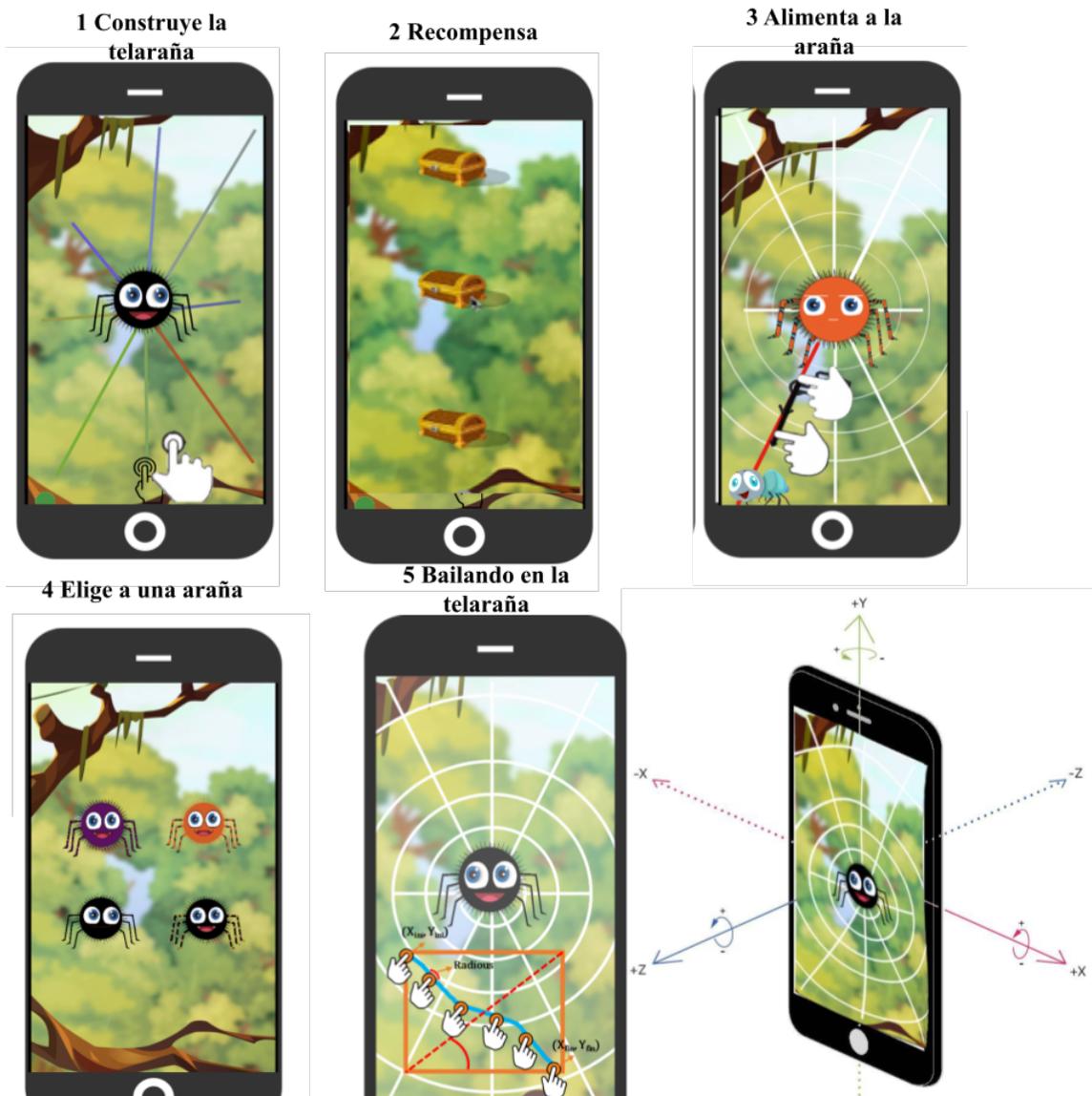


Figura 22. La figura presenta cinco capturas de pantalla que muestran las principales características de Feel and Touch. 1) Construir la telaraña: esta actividad presenta una araña en el centro de la pantalla y líneas de colores que representan la telaraña que se está construyendo. 2) Recompensas: esta captura de pantalla representa tres cofres del tesoro alineados verticalmente, lo que permite a los niños elegir uno para recoger una recompensa sorpresa que hay en su interior. 3) Alimentar a la araña: esta actividad presenta a la araña en el centro con una línea roja y una representación del movimiento de arrastre necesario para mover las patas de la araña y conseguir uno de los bichos situados al final de la línea roja. 4) Araña disponible. Muestra las arañas recogidas a lo largo del juego como recompensa para que los niños puedan seleccionar su favorita para realizar la última actividad. 5) Bailando en la telaraña: muestra la araña seleccionada en el centro de la pantalla, y los niños pueden tocar o arrastrar la araña; el juego reproduce el patrón vibrotáctil asociado a cada gesto. La Figura muestra un arrastre, la línea azul representa el arrastre, el cuadro naranja representa el cuadro delimitador, la línea amarilla representa el ángulo del cuadro delimitador.

4.2.2.3. Implementación de Feel and Touch

Feel and Touch se implementó para correr en versiones de iPhone 8 con sistema operativo iOS 14 en adelante, se utilizó el lenguaje de programación Swift, el framework de videojuegos SpriteKit y Xcode versión 13.3.1 (Figura 23). SpriteKit es un motor de videojuego 2D de Apple con soporte de OpenGL, cuenta con gráficos texturizados, un motor de física integrada, sistema de coordenadas, y un sistema de partícula. Como la mayoría de los motores de juegos, usa un ciclo para actualizar la pantalla, el ciclo recorre los siguientes pasos en la generación de cada escena:

- Actualiza la escena y sus objetos
- Evalúa acciones
- Simula físicas
- Aplica restricciones
- Genera la escena.

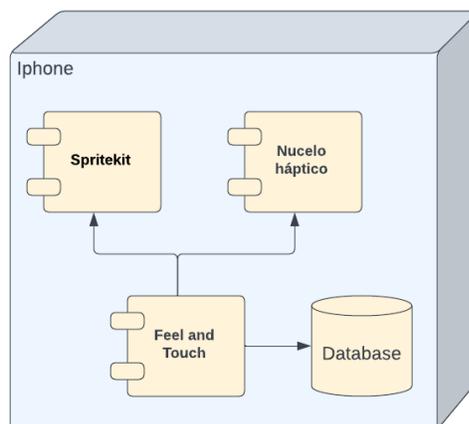


Figura 23. La figura muestra un diagrama de despliegue donde se muestran los componentes de Feel and Touch

El método Actualizar nos permite monitorear de manera continua cuando inicia y termina una interacción táctil. Las interacciones táctiles se registran de manera automatizada en archivos CSV, generando un archivo distinto para cada actividad. Este enfoque facilita la recopilación y organización de los datos derivados de las interacciones táctiles, posibilitando su posterior análisis y evaluación.

Para la implementación de los patrones vibrotáctiles utilizamos el núcleo háptico de iOS, el cual permite componer y reproducir patrones vibrotáctiles para dar retroalimentación al usuario. Para el patrón plano utilizamos el tipo de evento háptico transitorio y para el patrón rampa utilizamos el tipo de evento háptico continuo. Un evento transitorio se registra como un golpecito o un impulso, mientras que un evento continuo se siente como un zumbido prolongado de mayor duración. Para cada evento se puede modificar la intensidad, la cual va de 0 a 1; el evento continuó además permite modificar cuantos segundos se necesitan para alcanzar la intensidad máxima y para regresar a la intensidad mínima.

4.2.3. Escenario de uso

Javier es un niño con TEA de cuatro años, quien jugara por primera vez con Feel and Touch. Su maestra lo lleva al aula donde jugara y le pide que se siente y ponga las manos sobre la mesa, le pide que con la mano izquierda tome el teléfono y coloque su dedo índice en el anillo que tiene colocado el teléfono.

Javier sostiene el teléfono y la maestra inicia el juego. Aparece una araña en el centro de la pantalla y le cuenta a Javier que necesita de su ayuda para construir su telaraña y comer. Después empieza el tutorial de la actividad "Alimenta a la araña", la araña le dice que debe tocar la pantalla con un dedo y quitar el dedo de la pantalla, para que ella se pueda mover. Al finalizar el primer nivel aparece una pantalla con tres cofres y Javier debe seleccionar uno del cual sale una araña de otro color, Javier se sorprende y dice "Una nueva araña".

Javier termina el nivel dos y vuelve a recibir una araña. Durante el nivel tres de "Alimenta a la araña", Javier deja de poner atención, y él la araña le dice: "Recuerda tocar la pantalla cuando sientas la vibración"; Javier sigue distraído, y en la pantalla aparecen unos puntos y la voz de la araña diciendo: "Recuerda tocar la pantalla cuando sientas la vibración"; Javier vuelve a poner atención y completa el nivel.

Al finalizar el nivel tres aparece una animación de la araña y le dice a Javier: "Gracias por ayudarme, ahora puedo comer" y comienza el tutorial de Alimentar a la araña, donde la araña le dice a Javier que para ayudarla a comer tiene que estirar una de sus patitas para que sienta la vibración y descubra donde están los bichitos. Javier completa el tutorial y completa los tres niveles, al finalizar el nivel 1 y 2 recibe una araña nueva.

Al finalizar el tercer nivel de Alimentar a la araña, aparece una animación de la araña quien le dice:

Gracias por ayudarme a comer, como recompensa te dejaré jugar con mi telaraña, y le pide a Javier que seleccione la araña que más le gusta y comienza el nivel bailando en la telaraña.

Cuando Javier termina de jugar le dice a su maestra que le gusto mucho, pero la araña es muy gorda y le gusta comer mucho.

4.2.4. Adopción y percepción de experiencia de uso

Realizamos una evaluación para conocer la percepción de *Feel and Touch* por parte de los niños, esta evaluación nos ayudó a entender si el juego les agrada a los niños.

4.2.4.1. Participantes

Treinta y seis niños NT (19 niños) de entre tres y seis años de edad (4.36 ± 0.68) completaron *Feel and Touch*. Todos los niños eran diestros.

4.2.4.2. Métodos

Todos los niños completaron el juego de *Feel and Touch* en una sola sesión, cada niño completo el juego de manera individual. Eliminamos los estímulos visuales y auditivos en el aula donde completaron los niños el juego, usamos una silla y mesa para niños, los niños colocaron las manos sobre la mesa y sostuvieron el teléfono con la mano izquierda. Utilizamos un Iphone 8 para correr el juego y le colocamos un anillo para sostener el teléfono.

Después de que los niños completaran *Feel and Touch* les pedimos que respondieran a las preguntas del cuestionario de la diversión (Read, 2008). Cada niño completó el cuestionario en una sesión individual, donde le leímos cada pregunta y el niño respondía seleccionando una cara de la escala de los Cinco Grados de Felicidad (Hall et al., 2016), que es una escala que utiliza cinco caras con diferentes expresiones (de feliz a infeliz).

El cuestionario incluye 4 preguntas: (1) ¿Cuánto te ha gustado jugar *Feel and Touch*? (2) ¿Qué tan divertido fue jugar *Feel and Touch*? (3) ¿Cuánto te gustaría volver a jugar *Feel and Touch*? (4) ¿Cuánto te gustaría tener *Feel and Touch* en casa?

4.2.4.3. Resultados

Los cuestionarios de autoinforme indicaron que a todos los niños les gustaría jugar el juego nuevamente, percibieron que era divertido jugarlo y les gustaría tenerlo en casa. El 54 % de los niños respondieron que les gusta jugar con *Feel and Touch*, mientras que el 5 % de los niños respondieron que no les gusta jugar.

El 51 % de los niños indicaron que les gustaría jugar nuevamente con *Feel and Touch*, y ninguno de los niños indicó que no querría jugar de nuevo; el 36 % de los niños expresaron que jugar con *Feel and Touch* les pareció super divertido, y el 30 % expresó que solo les pareció divertido jugar.

El 48 % de los niños expresaron que les gustaría tener *Feel and Touch* en sus hogares, y solo el 8 % de los niños expresaron que les gustaría un poco tener el juego en sus hogares.

4.3. Captura y caracterización de datos para la identificación de marcadores digitales del TEA

En esta sección describimos los materiales, el procedimiento para recolectar los datos, la preparación y creación de los conjuntos de datos, la selección y extracción de características y la evaluación de modelos de clasificación.

4.3.1. Participantes

Reclutamos 69 niños NT (33 niños/36 niñas) entre tres a seis años de edad ($m = 4.50 \pm 0.71$) y 19 niños con TEA (14 niños / 5 niñas) entre tres a seis años de edad (4.92 ± 1.05). Los niños con TEA fueron reclutados de un centro especializado en el cuidado de niños con TEA y los niños NT de un preescolar

privado en el centro de México. El padre/madre o cuidador principal dio su consentimiento por escrito de la participación de cada niño.

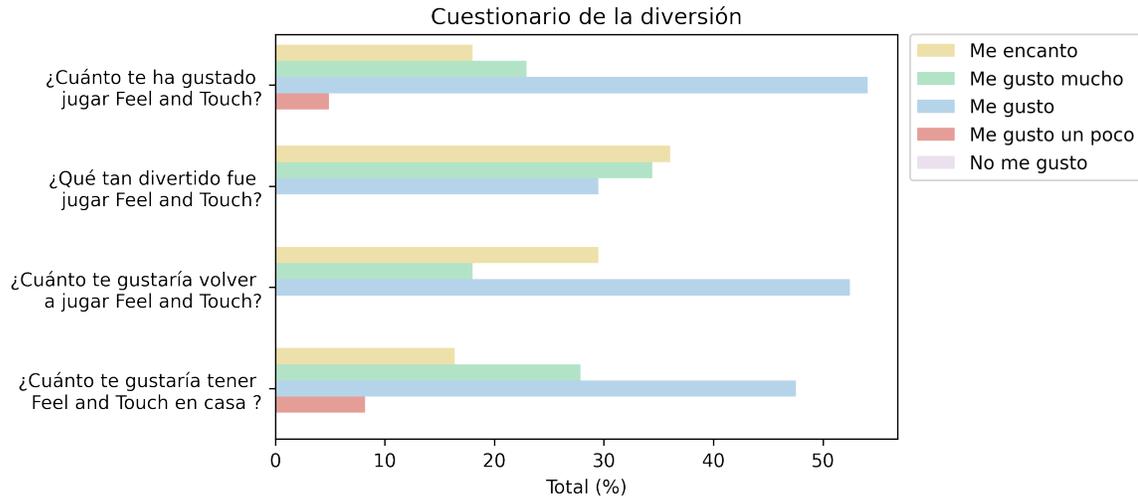


Figura 24. La figura muestra los resultados del cuestionario de la diversión. Cada barra representa una de las cinco respuestas. Se muestra el porcentaje niños que dieron cada una de las respuestas.

Todos los niños con TEA tenían un diagnóstico basado en ADOS-2, no estaban bajo tratamiento farmacológico, y eran capaces de interactuar con un teléfono móvil. Para evitar errores de confusión en nuestro análisis, evaluamos a todos los niños reclutados utilizando tres cuestionarios:

- **Cociente del Espectro Autista** (AQ-10 por sus siglas en inglés *Autism Spectrum Quotient*). Es un cuestionario de cribado de TEA de 10 preguntas.
- **Cuestionario de Perfil Sensorial Corto** (SSP por sus siglas en inglés *Short Sensory Profile*). Es un cuestionario para evaluar el procesamiento sensorial en niños.
- **Prueba de motricidad del Cuestionarios de Edades y Etapas-3** (ASQ-3 por sus siglas en inglés *Ages and Stages Questionnaires*). Es un cuestionario que evalúa diferentes áreas del desarrollo de los niños, entre ellas la motricidad fina y gruesa.

Los padres contestaron el cuestionario AQ-10 y el SSP. Las maestras y terapeutas contestaron las preguntas de motricidad del ASQ-3, debido a que están familiarizadas con las pruebas de motricidad. Todas las respuestas fueron escritas a mano y transcritas a un archivo electrónico.

Encontramos que 24 de los niños NT obtuvieron puntuaciones debajo del promedio en las pruebas SSP y ASQ-3, por lo que no se tomaron en cuenta los datos de estos niños para el análisis. Se identificaron

4 niños obtuvieron una puntuación arriba de 6 en la prueba AQ-10 lo que indica que deben ser referidos a un diagnóstico de TEA Además cinco niños no completaron el juego, por lo que sus datos también fueron descartados. Al final, el conjunto de datos que utilizamos para el análisis consta de interacciones táctiles de 36 niños con NT y 19 niños con TEA (Tabla 15)

Tabla 15. La tabla muestra los datos demográficos de los participantes reclutados

	NT	TEA
Número de niños (N)	36	19
Masculino/Femenino (N)	19/17	14/5
Edad (años \pm D.E.) 3-6 años	4.36 \pm 0.68	4.78 \pm 0.91

4.3.2. Procedimiento

El estudio tuvo una duración de tres meses y se realizó en dos lugares: un preescolar regular privado y una clínica especializada en el cuidado de niños con TEA. En ambos lugares usamos un escenario similar, para minimizar las distracciones de los niños, el estudio se realizó en un aula individual donde removimos todos los estímulos visuales y auditivos, en el aula solo se encontraba una mesa y silla para niños, sobre la mesa colocamos el Iphone 8 para correr el juego (Figura 25).

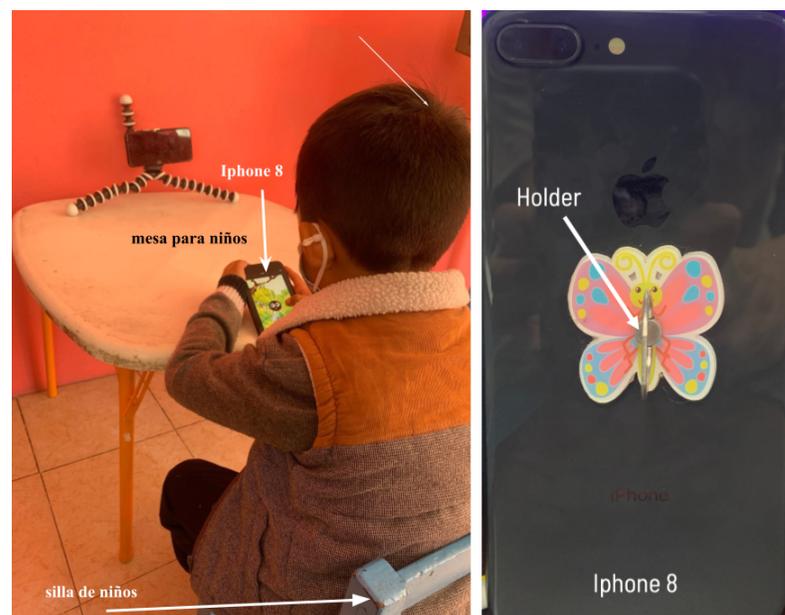


Figura 25. La imagen de la izquierda muestra la instalación que usamos durante el estudio. Los participantes se sentaron en una silla para niños y se les pidió que colocaran los brazos sobre la mesa para niños. Utilizamos un Iphone 8 al cual le colocamos un anillo para facilitar el uso.

Le colocamos un sujetador al Iphone para facilitar su manipulación, y le pedimos a los niños que apoyaran sus brazos sobre la mesa. Además del niño, en el aula se encontraba un miembro del equipo de investigación; y, en el caso de los niños de preescolar, el director del centro acompañó y permaneció con cada niño en el aula.

En el caso de los niños con TEA, pedimos a los cuidadores de cada niño que permanecieran en el aula para ayudarnos en caso de que el niño presentara comportamientos desafiantes, como llorar, gritar, querer salir del aula. Pedimos al director del centro de preescolar y a los cuidadores que se mantuvieran a una distancia mínima de 1,5 metros de los niños y que no tocaran la pantalla ni dieran instrucciones al niño.

Dado que el juego sigue una estrategia de aprendizaje gradual, optamos por no asignar a los niños de manera aleatoria en diferentes grupos. En su lugar, los participantes atravesaron dos fases del estudio de manera individual. La primera fase se realizó en dos sesiones que tuvieron lugar en la misma semana, mientras que la segunda fase se llevó a cabo en la semana siguiente, con una única sesión.

A continuación, se detallan ambas fases:

- **Sesiones de sensibilización:** Antes de iniciar la captura de datos realizamos una semana de sensibilización (Mercado et al., 2021; Cibrian et al., 2018). Estas sesiones tenían como objetivo ayudar a los niños con TEA a ser más receptivos en cuanto al uso del Iphone y que pudieran jugar diferentes juegos, ya que las psicólogas que trabajan en el centro de atención de TEA, comentaron que algunos niños pudieran tener asociados el uso de un teléfono móvil con una actividad específica y podrían no aceptar una nueva actividad.

Durante las sesiones de sensibilización, los niños jugaron juegos móviles casuales diseñados para niños de entre tres y seis años de edad. En total los niños realizaron dos sesiones y cada sesión duró aproximadamente cinco minutos.

- **Completar el juego:** Los niños jugaron una única vez con *Feel and Touch* por alrededor de 12 minutos. Primero el juego le mostró a los niños un video sobre como la araña pierde su telaraña y pide ayuda, después los niños tuvieron que completar el tutorial de Construir la telaraña y completar los tres niveles de esta actividad.

Después los niños completaron el tutorial de Alimenta a la araña y completaron los tres niveles, los niños terminaron el juego con la actividad de Bailando con la telaraña.

4.3.3. Recolección de datos

Para cada interacción táctil que los niños realizan guardamos los valores de la pantalla y de los sensores internos del teléfono (acelerómetro y giroscopio). Para cada interacción táctil se recolectan los datos desde el momento en el que el niño toca la pantalla hasta que quita el dedo, los datos son capturados cada 2 milisegundos. Una interacción táctil es capturada como una serie consecutiva de datos, y cada interacción táctil tiene un identificador(ID) para identificar dónde empieza y termina (Tabla 16).

Para cada actividad se genera un archivo CSV donde se guardan las interacciones táctiles generadas por niño, y las instrucciones que se dieron durante la actividad, además se especifica el tipo de instrucciones. En total, por cada niño se generan siete archivos CSV.

Tabla 16. La tabla muestra un ejemplo de la captura de los gestos, donde el ID indica a qué gesto pertenecen los datos, el tiempo en que se capturó, x,y, las coordenadas del gesto, fuerza, la fuerza que se aplica al realizar un gesto, acX,acY,acZ los valores del acelerómetro en los tres ejes, gX,gY,gZ los valores del giroscopio en los tres ejes y mRadius el área de la pantalla en puntos que se toca con el dedo.

id	tiempo	x	y	fuerza	acX	acY	acZ	mRadius
1	2.22	62.29	195.48	0	0.65	0.11	-2.14	15.80
1	2.30	62.29	195.48	0.01	0.61	0.16	-2.15	23.70
1	2.31	33.65	166.83	0.01	0.61	0.16	-2.15	23.79

4.3.4. Preparación de los datos y creación de conjunto de datos

Para garantizar la calidad de los datos, en primer lugar, limpiamos el conjunto de datos, separamos las interacciones táctiles de las instrucciones. En total recolectamos 16584 interacciones táctiles, las cuales etiquetamos como TEA o NT (Tabla 17)

4.3.5. Extracción de características

Los datos consecutivos de cada gesto se transformaron a un solo vector de características, el cual incluye 13 características derivadas de los datos internos del teléfono, de la pantalla y de la interacción de los niños (e.g., fuerza, acelerómetro, giroscopio). Para cada característica calculamos valores estadísticos (i.e. media, desviación estándar).

Tabla 17. Descripción del conjunto de análisis. Se describe el total de participantes de los que provienen las interacciones táctiles. El total de interacciones táctiles para cada grupo y las interacciones táctiles promedio por participante en cada grupo.

	NT	ASD
Total participantes	36	19
Total interacciones táctiles	10541	6043
Interacciones táctiles promedio por participante \pm D.E	301.17 \pm 195.46	335.72 \pm 225.95

A Partir de las características capturadas con *Feel and Touch* calculamos otras características (Tabla 18) basadas en la bibliografía sobre interacciones táctiles móviles (Anthony et al., 2013; Bo et al., 2013; Rubine, 1991; Xu et al., 2012). En total, para cada interacción táctil generamos un vector de 77 características.

4.3.6. Análisis de las características

Para comprender de manera más profunda las diferencias entre niños con TEA y NT, así como para identificar marcadores digitales que puedan ser indicativos de TEA, hemos dividido nuestro análisis de las características en dos fases fundamentales descritas a continuación: (1) reducción de y selección de características, (2) análisis exploratorio.

4.3.6.1. Reducción y selección de características

En primer lugar, hemos llevado a cabo una reducción de características, la literatura ha demostrado que la selección cuidadosa de características es esencial en la detección de marcadores digitales, ya que permite discernir las características más relevantes mientras filtra las que son redundantes o irrelevantes. Empezamos por reducir las características que están altamente correlacionadas utilizando como umbral 0.9, un valor que ya ha sido usado en la literatura (Anzulewicz et al., 2016).

Para seleccionar las características más relevantes, para este estudio en particular, utilizamos una selección por filtro (Pudjihartono et al., 2022), la cual se basa en la utilización de un conjunto de métricas, estadísticas y puntuaciones para evaluar la importancia de cada característica de forma individual. Este método permite determinar cuán relevante es cada característica por sí misma, sin tener en cuenta

la interacción con otras características del conjunto de datos. Específicamente, nosotros empleamos la estadística del F-test, el cual calcula la relación entre la varianza entre grupos y la varianza dentro de un grupo para una característica. Las características se ordenan en función de los valores más altos de f-score.

Después de ordenar las características en función del f-score, utilizamos una búsqueda en rendija para encontrar el número de características necesarias para crear un modelo de aprendizaje automático capaz de diferenciar las interacciones táctiles de niños con TEA de NT. Para la búsqueda en rendija utilizamos una regresión logística, que se repite N veces dependiendo de la cantidad de características y en cada iteración se va agregando una característica y se guarda el valor de la exactitud que se alcanza utilizando esa cantidad de características. Al final se obtiene como resultado el número de características necesarias para alcanzar el valor máximo de exactitud.

4.3.6.2. Análisis exploratorio

Después de reducir el conjunto de características, procedimos a analizar cada característica mediante el uso de estadística inferencial. Realizamos una prueba de Shapiro para comprobar la normalidad de los datos. Las diferencias de grupo en edad y sexo entre niños con TEA y NT se evaluaron mediante una prueba de T-test de dos colas. Posteriormente, se realizó una correlación de Benferri. La significancia se fijó en el nivel 0.5,

Se calculó el tamaño del efecto (d) con la prueba D de Cohen entre niños con TEA y NT. Se utilizó la correlación de Spearman (r) para evaluar la relación entre las características demográficas (edad, sexo), y el rendimiento en el juego. Analizamos las características más relevantes y las agrupamos de manera manual para definir los marcadores digitales.

4.3.7. Evaluación de modelos de clasificación

Definimos una tarea de clasificación binaria para distinguir las interacciones táctiles de los niños con TEA de los niños NT. Utilizamos nuestro conjunto de datos para entrenar y probar una Regresión Logística.

Tabla 18. La tabla describe las características calculadas a partir de los datos de las interacciones táctiles. Las características fueron tomadas de la literatura

Característica	Descripción	Fórmula
<i>F1.</i> Aceleración total	Aceleración total de la vibración producida por la interacción de los niños	$F1\sqrt{AX^2 + AY^2 + AZ^2}$
<i>F2.</i> Cuadro delimitador	Dos vectores bidimensionales(x,y) que representan el origen y el final del cuadro alrededor de cada interacción táctil	$F2 = ini(x, y), fin(x, y)$
<i>F3.</i> Diagonal del cuadro delimitador	Longitud de la diagonal del cuadro delimitador	$F3 = \sqrt{(x_{max} - x_{min})^2 + (y_{max} - y_{min})^2}$
<i>F4.</i> Ángulo del cuadro delimitador	El ángulo formado por la diagonal del cuadro delimitador.	$F4 = \arctan \frac{y_{max} - y_{min}}{x_{max} - x_{min}}$
<i>F5.</i> Área del cuadro delimitador	Área total de la interacción táctil.	$F5 = (y_{max} - y_{min}) * (x_{max} - x_{min})$
<i>F6.</i> Aspecto del cuadro delimitador	Relación proporcional entre la anchura y la altura del cuadro delimitador	$Anchocuartro/altodelcuadro$
<i>F7.</i> Distancia.	Distancia entre el primer y el último punto de la interacción táctil en puntos.	$F7 = \sqrt{(X_p - i - X_0)^2 + (Y_p - i - Y_0)^2}$
<i>F8.</i> Variabilidad	La suma acumulada de la distancia euclidiana entre puntos adyacentes	$s = \sum_i = 0^n - 1F7$
<i>F9.</i> Densidad.	Relación entre la longitud de la interacción táctil y la distancia	$F9 = \frac{F8}{F7}$
<i>F10.</i> Rendimiento juego	Total de interacciones táctiles	$F10 = contar(ID)$
<i>F11.</i> Duración.	Duración de la interacción táctil	$F11 = Tiempo_{fin} - Tiempo_{ini}$
<i>F12.</i> Velocidad angular	Velocidad a la que gira el teléfono móvil.	$F12 = \sqrt{GX^2 + GY^2 + GZ^2}$
<i>F13.</i> Velocidad promedio.	Velocidad a la que se realiza una interacción táctil	$F13 = \frac{F8}{F11}$

Utilizamos scikit-learn (Pedregosa et al., 2011) una librería para aprendizaje automático en Python, que proporciona algoritmos de aprendizaje supervisados y no supervisados. Entrenamos un modelo usando todas las características y un modelo con las características seleccionadas en la etapa anterior.

Dado que nuestro conjunto de datos se encuentra desbalanceado, nos enfocamos principalmente en la

precisión y el recall. Para validar nuestros resultados, utilizamos la validación cruzada de 10 pliegues, que generalmente proporciona una estimación fiable del rendimiento del modelo.

4.4. Resultados

4.4.1. Correlaciones entre el rendimiento del juego, la edad y género

No hubo diferencias estadísticamente significativas en cuanto a la edad ($p=2.48$) o el sexo ($p=0.13$) entre los niños NT ($N=36$ niños) y ASD ($N=19$ niños), lo que indica una distribución equilibrada similar de los factores demográficos entre los dos grupos. Tampoco encontramos una correlación estadísticamente significativa entre la edad y el rendimiento del juego ($r=0.03$, $p=0.84$; $N=55$), ni entre el género y el rendimiento del juego ($r=0.007$, $p=0.96$; $N=55$), lo que sugiere que la edad y el género no tuvieron un impacto significativo en el resultado del rendimiento del juego, por lo que esta variable no se utilizó para hacer comparaciones entre grupos.

4.4.2. Marcadores digitales

Encontramos diferencias estadísticas en términos de varias características de interacción táctil. La Figura 26 muestra la distribución de las interacciones táctiles para cada característica. La figura 27 describe los valores p y el tamaño del efecto de cada característica al comparar las interacciones táctiles de los niños con TEA ($N= 10541$ interacciones táctiles) y los niños NT ($N= 6043$ interacciones táctiles) En la siguiente sección describimos los marcadores digitales encontrados en este trabajo (Tabla 19)

4.4.2.1. Inclinación

Aunque todos los participantes utilizaron el teléfono móvil con un soporte para reducir el movimiento y hacerlo más cómodo de usar, las interacciones táctiles y la forma en que colocaron el teléfono en sus manos influyeron en la dirección de inclinación del teléfono.

Tabla 19. La tabla describe los marcadores digitales encontrados en este caso de estudio, así como las características asociadas a cada marcador

Grupo	Marcador digital	Descripción	Características
Inclinación	Dirección de la inclinación	El teléfono se acelera mediante el movimiento de inclinación en la dirección deseada. A partir de los sensores internos de aceleración, se calculan diferentes medidas al girar el teléfono. El teléfono puede inclinarse hacia la izquierda o hacia la derecha (inclinación horizontal), hacia arriba o hacia abajo (inclinación vertical) y hacia atrás o hacia delante ((inclinación profunda) (Boring et al., 2009).	$acZ_{mean} - abs$
Toqué	Aceleración total	Aceleración total de la vibración producida en el teléfono cuando un niño realiza una interacción táctil.	$Aceleracion_{total}$
	Distancia hacia el centro	Distancia horizontal (eje x) en puntos desde el toque inicial y final y el centro de la pantalla del teléfono.	$x - mean$

La inclinación en el eje Z ($acZ_{mean} - abs$) muestra que los niños con TEA (2.33 ± 0.79) en promedio movieron más el teléfono hacia adelante/atrás que los niños NT (1.5 ± 0.84). La Figura 26- $acZ_{mean} - abs$ muestra como en el caso de los niños con TEA aproximadamente el 75% de las interacciones se encuentran entre 2 y 3 (m/s), mientras que las interacciones de los niños NT se encuentran más dispersas.

4.4.2.2. Toque

Aunque todos los participantes utilizaron el mismo teléfono móvil y completaron el mismo juego, también hubo diferencias en las características relacionadas con él toque. Por ejemplo, la Aceleración total muestra

que en promedio las interacciones táctiles de los niños con TEA (2.42 ± 0.69) producen una aceleración mayor que los niños NT (1.74 ± 0.75). La Figura 26-Aceleración-total muestra cómo aprox. el 75% de las interacciones de los niños con TEA se encuentran entre 2 y 3 (m/s) mientras que el 75% de las interacciones de los niños NT se encuentran por debajo del 2.5 (m/s).

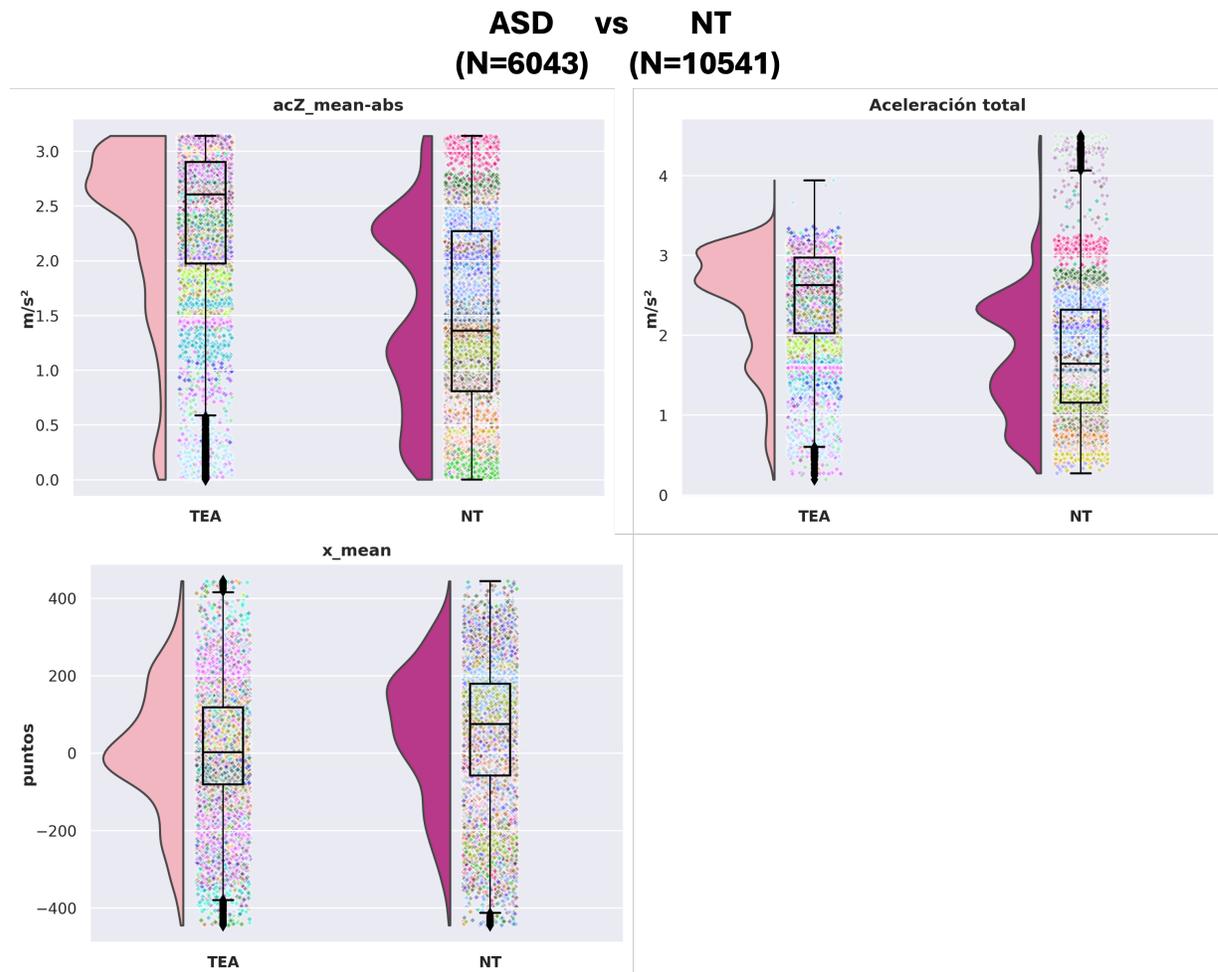


Figura 26. La figura muestra una gráfica de lluvia para cada característica. Cada figura muestra a la izquierda una gráfica de distribución de los datos y a la derecha una gráfica de caja, además se muestra la dispersión de los datos con puntos donde cada color representa a un niño.

La distancia horizontal hacia el centro de la pantalla (x_{mean}) muestra que en promedio los niños con TEA (5.54 ± 165.55) tienden a realizar interacciones táctiles más cerca del centro que los niños NT (52.7 ± 170.81). La Figura 26-X-mean muestra cómo la mayoría de las interacciones de los niños con TEA se encuentran cerca del cero, mientras que las interacciones de los niños NT se encuentran más sesgadas hacia valores mayores a cero.

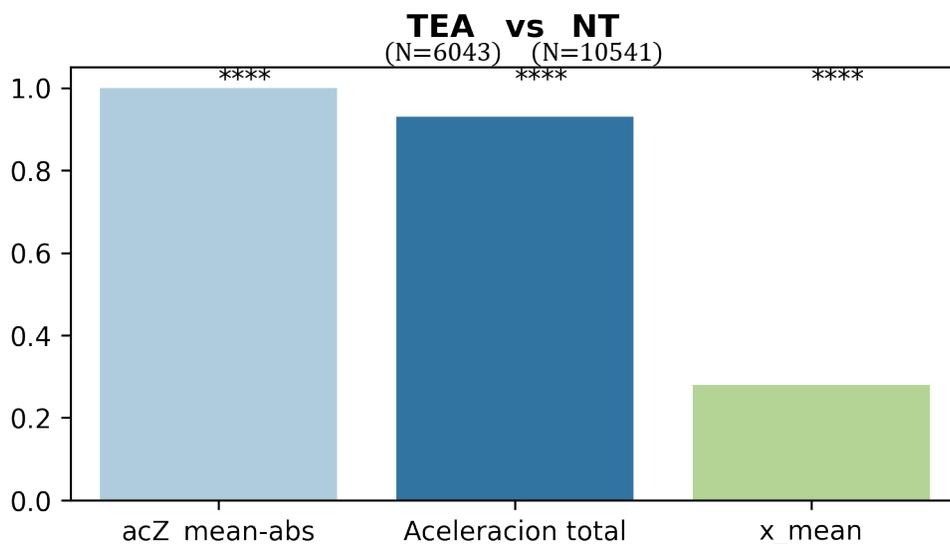


Figura 27. La figura muestra el tamaño del efecto de cada característica, los asteriscos en la parte superior el nivel de significancia. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; **** : $p < 0.00001$;

4.4.2.3. Rendimiento del modelo

Los resultados muestran que existe la viabilidad de construir un modelo automático capaz de distinguir las interacciones táctiles de niños con TEA y NT. Además, observamos que la precisión y el recall del modelo mejoran cuando se utilizan únicamente las características que seleccionamos en etapas previas de la investigación (Figura 28).

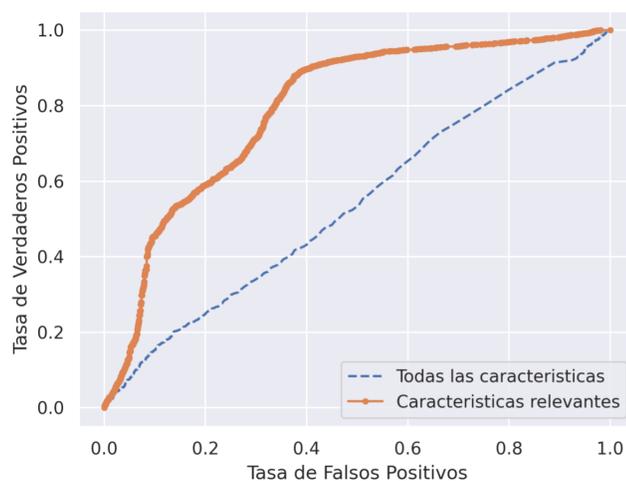


Figura 28. . La figura muestra una gráfica ROC donde se comparan los resultados de entrenar el modelo usando todas las características y usar las relevantes.

Utilizando las características más relevantes, el modelo tiene una precisión del 78 %, lo que muestra que está haciendo un buen trabajo al identificar a los niños con TEA sin cometer demasiados falsos positivos. Además, tiene un recall del 80 %, lo que indica que el modelo no deja sin identificar a la mayoría de los niños con TEA en el conjunto de datos (Tabla 20).

Tabla 20. La tabla muestra los resultados de entrenar el modelo con todas las características y usando solo las más relevantes. Se muestra la exactitud (AC), precisión, recall y el valor F1

Conjunto de características	CA	Precisión	Exhaustividad	F1
Todas	60	60	63	89
Relevantes	78	78	80	87

4.5. Discusión y conclusión del caso de estudio

Nuestros resultados muestran que es posible utilizar una interfaz háptica activa para recolectar interacciones táctiles de niños, en particular este caso de estudio muestra que los juegos para móviles aumentados con patrones vibrotáctiles promueven las interacciones táctiles en niños y que las características asociadas a estas interacciones tienen el potencial de identificar marcadores digitales del TEA. En general, los resultados del cuestionario de la diversión muestran que a los niños les gusto el juego.

Mediante un análisis exhaustivo de las características, identificamos un total de tres posibles marcadores digitales de TEA que podrían utilizarse como punto de partida para analizar las interacciones táctiles de los niños. Estos marcadores pueden clasificarse en dos grupos distintos, Inclinación y Toqué.

Con respecto al grupo de Inclinación, aunque todos los participantes utilizaron el teléfono móvil con un soporte, el teléfono captó pequeños movimientos a lo largo del tiempo. Los pequeños movimientos se producen de forma natural al realizar interacciones táctiles en un teléfono que no es totalmente estático. Nuestros resultados muestran que estos pequeños movimientos pueden analizarse y utilizarse para distinguir patrones en niños con TEA.

En particular, encontramos que existe mayor diferencia cuando los niños con TEA mueven el teléfono hacia atrás/adelante en comparación con los niños NT. Este resultado podría deberse a que los niños sostienen el celular con una mano y cuando realizan una interacción táctil pueden empujar el teléfono o acercarlo más a ellos.

Otros trabajos similares también han sugerido que los problemas motores de los niños con TEA afectan

su manipulación con los dispositivos móviles (Rafique et al., 2019; Anzulewicz et al., 2016), aunque estos trabajos se han centrado más en el uso de tabletas y han explorado principalmente los movimientos horizontales y verticales.

En este estudio analizamos el valor absoluto de la dirección del movimiento, por lo cual no sabemos si el movimiento producido por los niños con TEA es más predominante hacia atrás o hacia adelante, por lo que es necesario realizar otras investigaciones para determinar en qué dirección mueven más los niños con TEA el teléfono.

Los resultados de estos marcadores digitales sugieren que necesitamos trabajar en el diseño de *Feel and Touch* y en futuros trabajos incorporar interacciones basadas en movimientos como los gestos 3D, los cuales podrían darnos más información sobre el movimiento de la mano de los niños con TEA. Existe la oportunidad de desarrollar y utilizar tecnología accesible para el seguimiento de los movimientos de la mano para apoyar el cribado y seguimiento de los niños con TEA.

En cuanto al Toque, aunque todos los participantes utilizaron el mismo teléfono móvil y no hubo diferencias en el tamaño de la pantalla, sí hubo diferencias en el espacio utilizado por los niños con TEA para realizar interacciones táctiles. Nuestros resultados indican que los niños con TEA tienden a tocar más cerca del centro que los niños NT, esto podría estar relacionado con otros trabajos que han mostrado que los niños con TEA se fijan más en el centro de la pantalla (Oliveira et al., 2021); Otros trabajos similares también han encontrado que las interacciones de los niños con TEA se encuentran más cerca del centro; sin embargo, estos trabajos se han enfocado en explorar dispositivos móviles con una pantalla más grande como las tabletas (Perochon et al., 2023).

Además del espacio que utilizan los niños, en este caso de estudio exploramos la Aceleración total producida por las interacciones táctiles, este marcador digital ha sido explorado previamente en otros contextos, como característica para ser utilizadas como identificación única para desbloquear teléfonos móviles (Bo et al., 2013). Nuestros resultados muestran que existen diferencias en cómo los niños TEA y NT realizan las interacciones táctiles. La Aceleración total producida por los niños es una característica prominente que distingue a los niños con TEA de los niños NT; este resultado podría estar relacionado con los problemas de motricidad que presentan los niños con TEA.

La vibración que sienten del juego también pudo haber tenido algún impacto en sus interacciones táctiles; se necesitan estudios más explícitos para comprender completamente cómo los patrones vibrotáctiles afectan las interacciones táctiles de los niños con TEA. Hasta donde sabemos, se han realizado pocas investigaciones sobre el uso de la vibración táctil producida para distinguir a los niños con TEA. Los

marcadores digitales táctiles también podrían estar relacionados con deficiencias sensoriomotoras (Donnellan et al., 2013) y diferencias en el procesamiento visual (Oliveira et al., 2021; Wang et al., 2015) de los niños con TEA.

Es importante resaltar que dado el tamaño de nuestro conjunto de datos, el valor de p que se obtuvo para cada característica puede considerarse muy pequeño. Existen trabajos que han mostrado que el valor de p , depende del tamaño del conjunto de datos y entre más grande sea el conjunto de datos, más pequeño tiende a ser el valor de p (Gómez-de Mariscal et al., 2021; Jung, 2017).

Al trabajar con conjuntos de datos similares al de este trabajo, es importante considerar otros elementos que nos ayuden a entender las diferencias entre los grupos. En este trabajo calculamos el tamaño del efecto y realizamos un análisis visual para ayudarnos a tener un mejor entendimiento de la diferencia entre las interacciones táctiles de niños con TEA y NT.

Por otro lado, descubrimos que solo necesitamos tres características para construir un modelo de aprendizaje automático capaz de predecir si una interacción táctil es de un niño con TEA o no. La clasificación de las interacciones táctiles de niños con TEA resultó del uso de características básicas que describen cómo los niños inclinan el teléfono y cómo realizan la interacción táctil.

Para este caso de estudio utilizamos una regresión logística, los resultados muestran que el modelo tiene la capacidad para minimizar los casos en que la interacción táctil de los niños con TEA se clasifica como NT con una precisión del 80% y que el modelo puede identificar el 78% (recall) de las interacciones táctiles de los niños con TEA. Estos resultados podrían usarse como un punto de referencia para encontrar el modelo que mejor distingue las interacciones táctiles de niños con TEA.

Como trabajo futuro se pueden entrenar diferentes modelos con estas características y buscar la mejor configuración de hiperparámetros para crear un modelo robusto de clasificación de interacciones táctiles. Es de suma importancia trabajar de manera estrecha con un especialista para definir cuál es la métrica en la que necesitamos enfocarnos para evitar que un niño con TEA pierda la oportunidad de ser redimido con un especialista.

En resumen, este caso de estudio destaca el potencial de las interfaces hápticas activas para recopilar interacciones táctiles que pueden ser usadas para identificar marcadores digitales del TEA.

Capítulo 5. Conclusiones, aportaciones y trabajo futuro

5.1. Discusión y conclusiones

En general, en este trabajo de tesis describimos el proceso para diseñar e implementar interfaces hápticas y utilizarlas para recolectar interacciones táctiles de niños con TEA y niños NT así como el procedimiento para extraer características relevantes de estas interacciones, identificar marcadores digitales específicos del TEA y construir modelos de aprendizaje automático. Dado que interfaz háptica, pasiva y activas ofrecen distintas ventajas y posibilidades, en esta tesis se exploraron ambas.

Es importante destacar que la finalidad de los marcadores digitales y los modelos de aprendizaje automático es agilizar el proceso de cribado de TEA y los resultados deben considerarse como una herramienta de apoyo inicial, que ayuden en la referencia para el diagnóstico con especialistas. A continuación se discuten los resultados de este trabajo de tesis.

En términos de diseño, la interfaz háptica pasiva proporciona retroalimentación táctil de manera sutil y no intrusiva, esta interfaz consiste en una tela spandex que reproduce música cuando se realizan interacciones táctiles. Los niños pueden empujar o deslizar con la mano los elementos visuales y sentir la retroalimentación espacial que produce la tela.

Encontramos que los niños fueron capaces de completar las actividades y no mostraron reacciones negativas en cuanto a la retroalimentación que produce la tela; las características espaciales y materiales demostraron ser tolerables para los niños, también observamos que estas características parecen ser atractivas para los niños, y podrían fomentar otro tipo de interacciones, en algunos casos observamos que los niños querían interactuar usando la cabeza, los pies o todo el cuerpo.

Estos resultados sugieren que las características espaciales y materiales son adecuadas para diseñar interfaces hápticas pasivas para niños con TEA, además de que es posible combinar más de un tipo de retroalimentación. Aunque es importante trabajar en el diseño para permitir que los niños realicen otro tipo de interacciones. En cuanto a la duración de las actividades, los niños lograron completar las actividades de dos minutos y medio.

Por otro lado, la interfaz háptica activa consiste en un juego móvil que proporciona una retroalimentación táctil más dinámica, utiliza diferentes patrones vibrotáctiles para promover las interacciones táctiles de los

niños. A pesar de los desafíos sensoriales que suelen enfrentar los niños con TEA, los resultados muestran que los niños toleraron estas vibraciones y fueron capaces de completar todo el juego. Este hallazgo proporciona evidencia sobre la factibilidad de usar estímulos vibrotáctiles en el diseño de actividades para niños con TEA; en particular, los patrones en rampa y planos parecen no incomodar a los niños, la intensidad que proporcionan los teléfonos móviles es adecuada.

Estudios de usuario con niños mostraron que ambas interfaces son capaces de capturar interacciones táctiles que pueden ser usadas para el análisis e identificación de marcadores digitales. En ambos casos las interacciones táctiles se guardaron de manera automática sin presentar algún problema o pérdida de datos. En ambos casos pudimos recolectar información similar de las interacciones táctiles, a excepción de los datos producidos por los sensores propios de cada interfaz.

Este trabajo de tesis apoya la literatura que ha demostrado que en la identificación de marcadores digitales es importante primero reducir el número de características (Pudjihartono et al., 2022) para después realizar un análisis estadístico y visual más profundo para entender cómo difieren las interacciones táctiles de los niños con TEA de los niños NT.

A pesar de que cada interfaz háptica permite medir la fuerza, solo en el caso pasivo la fuerza resultó ser un marcador digital. Es importante considerar otro tipo de retroalimentación háptica activa para entender si la retroalimentación está teniendo un juego importante en la fuerza que aplican los niños para realizar interacciones táctiles.

En ambos casos encontramos potenciales marcadores digitales relacionados con el espacio que utilizan los niños para realizar interacciones táctiles. En el caso pasivo, los resultados muestran que los niños con TEA realizan interacciones táctiles menos anchas y menos largas que los niños NT mientras que el caso pasivo encontramos que las interacciones de los niños con TEA tienden a estar más cerca del centro.

El tamaño y tipo de actividad de cada interfaz puede influir en los marcadores encontrados en cada interfaz, por ejemplo, en el caso pasivo las actividades estructuradas guían un poco donde deben iniciar las interacciones táctiles los niños, mientras que en el activo las actividades estructuradas permiten que los niños inicien su interacción en cualquier punto de la pantalla.

En cuanto al tamaño, en la interfaz háptica activa los niños pueden ver la pantalla completa, mientras que en la pasiva, los niños se paran frente a un punto de la interfaz y no tienen una visión completa de la pantalla. Es importante trabajar con interfaces hápticas pasivas más pequeñas, y el diseño de más actividades para tener un mayor entendimiento del espacio que utilizan los niños con TEA para

realizar interacciones táctiles. Encontramos marcadores digitales que por las características propias de cada interfaz no se repitieron en los dos casos. Por ejemplo, la interfaz háptica activa, permite medir la inclinación del teléfono y la aceleración total. Esto no quiere decir que estos marcadores no pudieran ser explorados en una interfaz háptica pasiva, se podrían diseñar interfaces hápticas pasivas que cuenten con los sensores adecuados para medir estos marcadores.

Solo en el caso pasivo encontramos un potencial marcador digital relacionado al tiempo que requieren los niños con TEA para realizar interacciones táctiles. Esto podría estar relacionado con el tipo de retroalimentación de cada interfaz, en el caso pasivo notamos que a los niños con TEA parecía gustarles la sensación de la tela en sus manos y tardan más en realizar las interacciones táctiles, en el caso activo los patrones vibrotáctiles tienen una duración establecida y los niños no pueden sentir la vibración más allá de su duración.

Después de reducir el número de características y realizar el análisis de estas procedimos a la construcción de modelos de aprendizaje automático, los resultados muestran la viabilidad de construir modelos de aprendizaje automático para clasificar las interacciones táctiles de niños con TEA provenientes de una interfaz háptica.

Es importante destacar que en ninguno de los dos casos se realizó un ajuste de hiperparámetros; sin embargo, en el caso pasivo obtuvimos un resultado similar en la precisión y el recall (97 %) lo que sugiere que podría no ser necesario el ajuste de hiperparámetros; sin embargo, consideramos que es necesario realizar más experimentos antes de construir el modelo final.

En el caso activo, el recall es más alta que la precisión, lo que sugiere que el modelo tiende a identificar la mayoría de los casos positivos, pero puede tener un número significativo de falsos positivos. El equilibrio entre falsos positivos y falsos negativos es una consideración crítica en la detección de trastornos como el TEA.

Si bien es cierto que generar falsos negativos puede generar preocupación innecesaria en los padres, también es importante recordar que el cribado temprano y el diagnóstico oportuno pueden ser clave para proporcionar intervenciones tempranas y efectivas. Para no alarmar a los padres y evitar preocupaciones incensurables, una posible solución es dar un resultado después de varias sesiones de juego, dejar que el niño juegue por varios días y al final utilizar el modelo de clasificación para dar un resultado a los padres.

Los resultados de este estudio de tesis son reveladores y apuntan hacia un hallazgo fundamental: las interfaces hápticas tienen la capacidad de detectar marcadores digitales que pueden estar asociados al

TEA. Es importante destacar que estas interfaces pueden emplearse en una variedad de modalidades, tanto pasivas como activas.

Aunque hemos avanzado en la identificación de marcadores digitales, el campo de investigación de las interfaces hápticas y su relación con el TEA ofrece un vasto territorio para futuras investigaciones y avances significativos en la comprensión de este trastorno.

El uso de interfaces hápticas como herramientas de detección puede ser de gran importancia en la comunidad científica y clínica, ya que podría contribuir significativamente a una identificación temprana y una intervención oportuna en niños con TEA. Esto, a su vez, puede tener un impacto positivo en el pronóstico y la calidad de vida de estos niños al facilitar un acceso más rápido a los servicios y tratamientos necesarios.

Además, la versatilidad de las interfaces hápticas, tanto en términos de modalidades pasivas como activas, amplía el espectro de aplicaciones potenciales en la investigación y la atención médica. En conjunto, esta tesis proporciona una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el campo del TEA y la interacción táctil.

5.2. Limitaciones

Aunque en este trabajo de tesis se cumplió con los objetivos, se observaron diferentes limitaciones que se describen a continuación:

Desde una perspectiva técnica y práctica, el prototipo de *BendableSound* es frágil y dadas sus dimensiones no es posible utilizarlo en entornos pequeños. Además, el proceso de instalación es complejo, implica controlar la distancia, ajustar niveles de luz y asegurarse de que las piezas de PVC encajen correctamente, puede resultar complicado y requerir habilidades técnicas avanzadas. La sensibilidad a factores como la alineación precisa y la calibración adecuada puede generar problemas operativos. Si estos factores no se manejan de manera óptima, el sistema puede no funcionar de manera eficiente o precisa, lo que potencialmente afecta la calidad de los datos recopilados.

El prototipo actual de *BendableSound* solo puede detectar interacciones de tipo empuje o deslizamiento, esto significa que algunas formas de interacción, como jalar o pinchar, no pueden ser capturadas ni analizadas por el sistema. Dado que los niños pueden tener diferentes estilos de interacción, esta limi-

tación podría reducir la capacidad del sistema para proporcionar una imagen completa y precisa de las interacciones táctiles.

La limitación técnica en el caso de *Feel and Touch* es su falta de compatibilidad con dispositivos que no sean iOS, lo que restringe su accesibilidad a una audiencia más amplia que podría beneficiarse de esta herramienta. Además, las restricciones en cuanto a los niveles máximos y mínimos de vibración y la limitación de contar con un solo motor de vibración también son limitaciones importantes. Estas restricciones podrían impedir la exploración de aspectos clave de las interacciones táctiles de los niños con TEA, como: la capacidad de discriminar la ubicación de la retroalimentación háptica, lo que nos podría dar más información sobre el procesamiento táctil de los niños.

El uso de múltiples motores de vibración puede permitir una retroalimentación háptica más rica y diferenciada. Al no permitir ajustes en los niveles de vibración, la aplicación puede no ser adaptable a las preferencias individuales de los niños con TEA, que pueden tener sensibilidades táctiles diversas. Esto podría afectar la efectividad y la comodidad de la experiencia de uso.

Por último, es importante mencionar que los modelos posteriores al iPhone 8 no cuentan con sensor de fuerza, por lo que para futuros proyectos si se quiere seguir explorando la fuerza se debe buscar otra alternativa para medirla.

Desde la perspectiva metodológica, aunque en ambos casos se controló el ambiente, evitando distracciones y dando las instrucciones simples, al trabajar con niños existen factores que salen de nuestro control y que pueden generar ruido en los datos.

Observamos que algunos niños se llegaban a emocionar con el juego y realizaban movimientos que no teníamos contemplados, como mover más los brazos hacia arriba, voltear a vernos, o moverse de un lado a otro; en algunos casos los niños podían distraerse y empezar a platicar con la persona que estuviera en el aula.

Existen otros factores que podrían afectar la interacción de los niños, como su estado de ánimo, o si había sucedido algún cambio en su vida. Por ejemplo, en el caso de *Feel and Touch*, la recolección de datos se realizó poco después de que las restricciones de COVID-19 habían bajado y los niños empezaban a ir nuevamente a la escuela de manera presencial, tuvimos el caso de una niña que iniciaba el segundo año de preescolar, y eran sus primeras semanas en la escuela y durante la sesión desconoció el lugar donde estábamos realizando la sesión y comenzó a llorar por lo que no completo el juego.

En cuanto al tamaño de la muestra, nuestros conjuntos de datos están desequilibrados y podrían con-

siderarse pequeños. La limitación en la cantidad de datos recopilados puede deberse a las dificultades inherentes en el reclutamiento de niños con TEA, la prevalencia del TEA es baja según la Organización Mundial de la Salud, y en el contexto de México, muchos niños no están diagnosticados o reciben el diagnóstico después de los 5 años. Además, la relación entre el número de niños con TEA y niñas con TEA también es relevante. Dado que hay aproximadamente cuatro niños con TEA por cada niña con TEA, esto puede tener implicaciones en la representación de género en el estudio y, posiblemente, en la generalización de los resultados a nivel de género.

Es importante señalar que la mitad de este trabajo de tesis se realizó durante la pandemia de COVID-19, por lo que al iniciar el reclutamiento para el segundo caso de estudio nos enfrentamos con el cierre de escuelas y clínicas, lo que afectó directamente el acceso a los lugares donde se planeaba reclutar participantes, lo que retrasó la recolección de datos y el tamaño de la muestra que pudimos haber reclutado. Además, debido a las medidas de distanciamiento social y las restricciones en el contacto cercano con niños, limitó la interacción y la observación directa de los participantes.

Dado que la pandemia introdujo cambios en las circunstancias, la rutina y las experiencias de los niños, es importante considerar cómo estos cambios pueden haber afectado la validez de los resultados y reflejar situaciones excepcionales que no sean representativas de las condiciones normales. Por ejemplo, las maestras mencionaron que observaban retrasos en las habilidades motrices de los niños en comparación con niños de años anteriores, y que esto también pudo afectar que varios niños obtuvieron una puntuación por debajo del promedio en la prueba ASQ.

En cuanto al análisis, este estudio se centró en la identificación de marcadores digitales, pero no profundizó en el análisis de cómo las características específicas de cada interfaz pueden afectar las interacciones táctiles de los niños con TEA. No examinamos, por ejemplo, cómo la retroalimentación espacial o las particularidades de los patrones vibrotáctiles pueden influir en las respuestas táctiles de estos niños.

Creemos que explorar estas características de las interfaces puede tener un impacto más allá de la identificación de marcadores digitales; podría proporcionar información valiosa sobre el procesamiento táctil en los niños con TEA.

En este trabajo solo nos enfocamos en distinguir las interacciones táctiles de niños con TEA de niños NT; sin embargo, es necesario avanzar hacia escenarios más complejos que incluyan comparar las interacciones de los niños con diferentes niveles de TEA y otros con trastornos del neurodesarrollo como niños con apraxia u otras alteraciones motoras, o niños con riesgo de padecer TEA (aquellos con hermanos en el espectro de los TEA).

En términos de limitaciones que afectan la validez externa del estudio, es relevante mencionar que el trabajo se realizó en un contexto geográfico específico, que puede tener características únicas en términos de cultura, recursos, políticas, y sistemas de atención médica o educación. Esto significa que los resultados pueden estar influenciados por factores propios de ese lugar y no reflejar completamente la diversidad de situaciones que existen en otros países o estados.

En conjunto, estas limitaciones destacan la importancia de interpretar los resultados del estudio con precaución y de reconocer que los hallazgos pueden no ser aplicables de manera uniforme a todas las poblaciones y contextos. Además, subrayan la necesidad de abordar los desafíos en la recopilación de datos relacionados con el TEA y de considerar estrategias para aumentar la representatividad de los participantes en futuras investigaciones.

5.3. Aportaciones

Las principales aportaciones de este trabajo son las siguientes:

- Evidencia empírica del uso de interfaces hápticas para identificar marcadores digitales del TEA.
- Un conjunto de potenciales marcadores digitales del TEA
- Una interfaz háptica activa y una pasiva que pueden ser usadas para recolectar interacciones táctiles de niños
- Dos modelos de aprendizaje de máquina capaces de identificar las interacciones táctiles de niños con TEA.

Además, este trabajo de investigación dio como resultado los siguientes artículos publicados en revistas arbitradas:

- **Monarca, I.,** Tentori, M. & Cibrian, F.L. Understanding the musical interaction of children with autism spectrum disorder using elastic display. *Pers Ubiquit Comput* (2023). <https://doi.org/10.1007/s00779-022-01703-y>
- **Monarca, I.,** Cibrian, F.L., Chavez, E. et al. Using a small dataset to classify strength-interactions with an elastic display: a case study for the screening of autism spectrum disorder. *Int. J. Mach. Learn. & Cyber.* (2022). <https://doi.org/10.1007/s13042-022-01554-2>

En total, para la divulgación de esta investigación se realizaron:

- Dos artículos en revistas arbitradas.
- Dos artículos de conferencia cortos.
- Dos artículos de workshop

5.4. Trabajo futuro

Los resultados de este trabajo de estudio muestran que existen muchos retos en cuanto al diseño, y uso de las interfaces hápticas, a continuación se describe proyectos de investigación que se proponen como trabajo futuro.

5.4.1. Comparación de las características de los patrones vibrotáctiles

Los resultados muestran que los patrones vibrotáctiles de rampa y plano afectan la interacción táctil de los niños, sin embargo, es necesario explorar cómo otros patrones vibrotáctiles o incluso las características particulares de las vibraciones como la intensidad, la nitidez y el ritmo afectan las interacciones táctiles de los niños. Hasta nuestro conocimiento, la investigación sobre las características de los patrones vibrotáctiles y su influencia en las interacciones táctiles ha sido limitada, a pesar de que se ha señalado que los niños con TEA presentan variaciones en el tiempo de reacción y umbral de detección en relación con las vibraciones en comparación con niños NT (Puts et al., 2014a).

El estudio de cómo los patrones vibrotáctiles impactan en la percepción y respuesta táctil podría tener implicaciones significativas tanto en la tecnología háptica, así como enriquecer nuestro entendimiento de las respuestas sensoriales de los niños y aplicarse en diversas áreas más allá de la identificación de marcadores digitales del TEA, como el uso de patrones vibrotáctiles para terapias táctiles.

Es crucial profundizar en esta área de investigación para entender mejor cómo los patrones de vibración pueden ser diseñados y utilizados de manera más efectiva en diferentes aplicaciones prácticas; el estudio de cómo los patrones vibrotáctiles impactan en la percepción y respuesta táctil podría tener implicaciones

significativas tanto en la tecnología háptica como en la comprensión de trastornos como el TEA y la identificación de marcadores digitales.

5.4.2. Diseño de interfaces hápticas para recolectar nuevas interacciones

La diversidad de las interacciones táctiles es extensa, abarcando desde movimientos sutiles como toques con un solo dedo hasta movimientos más complejos que incluyen el uso de más de un dedo, como cuando se rota un objeto y se usan dos dedos. Explorar y desarrollar estos otros tipos de interacciones podría enriquecer el entendimiento de cómo interactúan los niños con TEA e identificar nuevos marcadores digitales del TEA.

Los hallazgos derivados de la interfaz háptica activa revelan diferencias significativas en la forma en que se manipula el teléfono móvil. Esto resalta la importancia de adentrarse en la exploración de interacciones en tres dimensiones (3D).

A diferencia de las interacciones táctiles tradicionales en dos dimensiones (2D) (e.g., tocar, deslizar) los gestos en 3D incorporan la dimensión adicional del espacio, lo que permite una mayor variedad de movimientos y acciones, como girar, mover o rotar un objeto usando las manos o los dedos, también es posible realizar interacciones moviendo una o más partes del cuerpo humano.

Varios estudios han investigado las disparidades en los patrones de movimiento entre niños con TEA y niños NT en un esfuerzo por detectar marcadores digitales (Ardalan et al., 2019; Naito et al., 2019; Crippa et al., 2015). Sin embargo, hasta la fecha, la exploración en torno al diseño de interfaces hápticas que incorporen gestos 3D ha sido limitada.

Los trabajos más cercanos a esta área han involucrado el uso de robots hápticos que simulan fuerza y se controlan mediante movimientos de la mano (Koirala et al., 2019; Zhao et al., 2018); sin embargo, estos robots no siempre resultan accesibles, lo que subraya la importancia de buscar nuevas interfaces hápticas.

Esta investigación no solo enriquecerá nuestra comprensión de las interacciones con interfaces hápticas, sino que también podría ofrecer oportunidades valiosas para el cribado del TEA y para mejorar el conocimiento que tenemos sobre el procesamiento táctil y su relación con el sistema motriz.

5.4.3. Diseño de patrones vibrotáctiles para herramientas terapéuticas

En este trabajo solo exploramos el uso de patrones vibrotáctiles para estimular las interacciones de los niños e identificar patrones vibrotáctiles; los resultados muestran que los niños pueden interactuar con patrones vibrotáctiles sin tener respuestas negativas sin embargo no exploramos el uso terapéutico de estos patrones.

Aunque el uso de interfaces hápticas como herramientas terapéuticas ha sido explorado ampliamente, el enfoque en la aplicación de patrones vibrotáctiles para terapias táctiles y sus consecuencias ha sido escaso. Por lo tanto, como un enfoque para futuros trabajos, se propone la investigación del diseño de patrones vibrotáctiles que tengan la capacidad de ser empleados en terapias táctiles, seguido por la evaluación rigurosa de sus efectos y beneficios potenciales.

Es importante mencionar que la utilidad de estos patrones vibrotáctiles podría extenderse más allá de las terapias táctiles. Los resultados obtenidos podrían enriquecer nuestro entendimiento de las respuestas sensoriales de los niños y aplicarse en diversas áreas. Este enfoque multidisciplinario podría aportar conocimientos valiosos en campos más amplios, contribuyendo a nuestro entendimiento general de la interacción humano-tecnología y el funcionamiento sensorial de los individuos.

5.4.4. Diseño de interfaces hápticas pasivas

A pesar de que los resultados de *BendableSound* son prometedores en cuanto al uso de interfaces hápticas pasivas para identificar marcadores digitales del TEA, una de sus limitaciones es el tamaño y espacio que requieren lo que dificulta su instalación. Por lo que es importante trabajar en el desarrollo de interfaces hápticas pasivas que sean más accesibles y adaptables, permitiendo su uso en diversos contextos y sin restricciones de ubicación. Este enfoque podría aumentar la utilidad y la viabilidad de las aplicaciones de cribado del TEA, brindando la oportunidad de un monitoreo más conveniente y efectivo.

Es importante mencionar que, si bien en este estudio solo exploramos las características espaciales y de textura en la interacción háptica, es posible que existan otras características que puedan evidenciar aún más las diferencias en el procesamiento sensorial de los niños con TEA.

En este sentido, como propuesta para trabajos futuros, se sugiere el diseño de una interfaz háptica pasiva

que incorpora una gama más amplia de texturas o características táctiles. Esto podría permitir un mayor entendimiento de las respuestas sensoriales de los niños con TEA y brindar ideas más profundas sobre cómo diseñar intervenciones y apoyos específicos para sus necesidades.

Literatura citada

- Albinali, F., Goodwin, M. S., & Intille, S. S. (2009). Recognizing stereotypical motor movements in the laboratory and classroom. In *Proceedings of the 11th international conference on Ubiquitous computing - Ubicomp '09*, 71, New York, New York, USA. ACM Press. <https://doi.org/10.1145/1620545.1620555>.
- Alcañiz Raya, M., Marín-Morales, J., Minissi, M. E., Teruel Garcia, G., Abad, L., & Chicchi Giglioli, I. A. (2020). Machine Learning and Virtual Reality on Body Movements' Behaviors to Classify Children with Autism Spectrum Disorder. *Journal of Clinical Medicine*, 9(5), 1260. <https://doi.org/10.3390/jcm9051260>.
- Ament, K., Mejia, A., Buhlman, R., Erklin, S., Caffo, B., Mostofsky, S., & Wodka, E. (2015). Evidence for Specificity of Motor Impairments in Catching and Balance in Children with Autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 45(3), 742–751. Publisher: Springer US, <https://doi.org/10.1007/s10803-014-2229-0>.
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders : DSM-5*. American Psychiatric Association. <https://www.psychiatry.org/psychiatrists/practice/dsm>.
- Anthony, L., Vatavu, R.-D., & Wobbrock, J. O. (2013). Understanding the Consistency of Users' Pen and Finger Stroke Gesture Articulation. <https://doi.org/10.5555/2532129.2532145>.
- Anzulewicz, A., Sobota, K., & Delafield-butt, J. T. (2016). Toward the Autism Motor Signature : Gesture patterns during smart tablet gameplay identify children with autism. *Nature Publishing Group*, (August), 1–13. Publisher: Nature Publishing Group, <https://doi.org/10.1038/srep31107>.
- Ardalan, A., Assadi, A. H., Surgent, O. J., & Travers, B. G. (2019). Whole-Body Movement during Videogame Play Distinguishes Youth with Autism from Youth with Typical Development. *Scientific Reports*, 9(1), 20094. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56362-6>.
- Ayres, A. J. (1972). *Sensory integration and learning disorders*. Western Psychological Services, Los Angeles, Calif.
- Banire, B., Al Thani, D., Qaraq, M., & Mansoor, B. (2021). Face-Based Attention Recognition Model for Children with Autism Spectrum Disorder. *Journal of Healthcare Informatics Research*, 5(4), 420–445. <https://doi.org/10.1007/s41666-021-00101-y>.
- Baranek, G. T., David, F. J., Poe, M. D., Stone, W. L., & Watson, L. R. (2006). Sensory Experiences Questionnaire: Discriminating sensory features in young children with autism, developmental delays, and typical development. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 47(6), 591–601. Publisher: John Wiley & Sons, Ltd, <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2005.01546.x>.
- Bhatia, P. K., Khosla, A., & Singh, G. (2018). Automated analysis of Gaze Patterns for Autism Screening-Density Approach. In *2018 First International Conference on Secure Cyber Computing and Communication (ICSCCC)*, 95–99. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSCCC.2018.8703321>.
- Bidwell, J., Essa, I. A., Rozga, A., & Abowd, G. D. (2014). Measuring Child Visual Attention using Markerless Head Tracking from Color and Depth Sensing Cameras. In *Proceedings of the 16th International Conference on Multimodal Interaction - ICMI '14*, 447–454, New York, New York, USA. ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2663204.2663235>.
- Bizzell, E., Ross, J., Rosenthal, C., Dumont, R., & Schaaf, R. (2020). Sensory Features as a Marker of Autism Spectrum Disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 50(6), 2240–2246. Publisher: Springer US, <https://doi.org/10.1007/s10803-019-03948-8>.

- Bo, C., Zhang, L., & Li, X.-Y. (2013). SilentSense: Silent User Identification via Dynamics of Touch and Movement Behavioral Biometrics. <https://doi.org/10.1145/2500423.2504572>.
- Boorse, J., Cola, M., Plate, S., Yankowitz, L., Pandey, J., Schultz, R. T., & Parish-Morris, J. (2019). Linguistic markers of autism in girls: evidence of a “blended phenotype” during storytelling. *Molecular Autism*, 10(1), 14. <https://doi.org/10.1186/s13229-019-0268-2>.
- Boring, S., Jurmu, M., & Butz, A. (2009). Scroll, tilt or move it: using mobile phones to continuously control pointers on large public displays. In *Proceedings of the 21st Annual Conference of the Australian Computer-Human Interaction Special Interest Group: Design: Open 24/7*, 161–168, Melbourne Australia. ACM. <https://doi.org/10.1145/1738826.1738853>.
- Briend, F., David, C., Silleresi, S., Malvy, J., Ferré, S., & Latinus, M. (2023). Voice acoustics allow classifying autism spectrum disorder with high accuracy. *Translational Psychiatry*, 13(1), 250. <https://doi.org/10.1038/s41398-023-02554-8>.
- Burns, R. B., Seifi, H., Lee, H., & Kuchenbecker, K. J. (2020). Getting in touch with children with autism: Specialist guidelines for a touch-perceiving robot. *Paladyn, Journal of Behavioral Robotics*, 12(1), 115–135. <https://doi.org/10.1515/pjbr-2021-0010>.
- Carette, R., Cilia, F., Dequen, G., Bosche, J., Guerin, J.-L., & Vandromme, L. (2018). Automatic autism spectrum disorder detection thanks to eye tracking and neural network-based approach. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76213-5_11.
- Cavallo, A., Romeo, L., Ansuini, C., Battaglia, F., Nobili, L., Pontil, M., Panzeri, S., & Becchio, C. (2021). Identifying the signature of prospective motor control in children with autism. *Scientific Reports*, 11(1), 3165. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82374-2>.
- Chaspari, T., Provost, E. M., Katsamanis, A., & Narayanan, S. (2012). An acoustic analysis of shared enjoyment in ECA interactions of children with autism. In *2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 4485–4488. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2012.6288916>.
- Chen, J., Wang, G., Zhang, K., Wang, G., & Liu, L. (2019). A pilot study on evaluating children with autism spectrum disorder using computer games. *Computers in Human Behavior*, 90, 204–214. Publisher: Pergamon, <https://doi.org/10.1016/J.CHB.2018.08.057>.
- Cibrian, F., Beltran, J., & Tentori, M. (2018). Assessing the Force and Timing control of Children with Motor Problems using Elastic Displays. In *Proceedings of the Proceedings of the 12th EAI International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare – Demos, Posters, Doctoral Colloquium*, 1–4. EAI. <https://doi.org/10.4108/eai.20-4-2018.2276348>.
- Cibrian, F. L., Madrigal, M., Avelais, M., & Tentori, M. (2020). Supporting coordination of children with ASD using neurological music therapy: A pilot randomized control trial comparing an elastic touch-display with tambourines. *Research in Developmental Disabilities*, 106, 103741. Publisher: Elsevier Inc., <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2020.103741>.
- Cibrian, F. L., Peña, O., Ortega, D., & Tentori, M. (2017). BendableSound: An elastic multisensory surface using touch-based interactions to assist children with severe autism during music therapy. *International Journal of Human-Computer Studies*, 107, 22–37. Publisher: Academic Press, <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2017.05.003>.
- Coll, S.-M., Foster, N. E., Meilleur, A., Brambati, S. M., & Hyde, K. L. (2020). Sensorimotor skills in autism spectrum disorder: A meta-analysis. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 76, 101570. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rasd.2020.101570>.

- Coravos, A., Khozin, S., & Mandl, K. D. (2019). Developing and adopting safe and effective digital biomarkers to improve patient outcomes. *npj Digital Medicine* 2019 2:1, 2(1), 1–5. <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0090-4>.
- Crippa, A., Salvatore, C., Perego, P., Forti, S., Nobile, M., Molteni, M., & Castiglioni, I. (2015). Use of Machine Learning to Identify Children with Autism and Their Motor Abnormalities. *Journal of Autism and Developmental Disorders*. ISBN: 0162-3257, <https://doi.org/10.1007/s10803-015-2379-8>.
- Dai, K. & Keshi (2007). Early diagnosis of autism through analysis of pre-speech vocalizations. *ACM SIGACCESS Accessibility and Computing*, (89), 42–46. Publisher: ACM, <https://doi.org/10.1145/1328567.1328575>.
- Dawson, G. (2008). Early behavioral intervention, brain plasticity, and the prevention of autism spectrum disorder. *Development and Psychopathology*, 20(3), 775–803. <https://doi.org/10.1017/S0954579408000370>.
- Demšar, J., Erjavec, A., Hočevár, T., Milutinovič, M., Možina, M., Toplak, M., Umek, L., Zbontar, J., & Zupan, B. (2013). Orange: Data mining toolbox in python. *J. Mach. Learn. Res.*, 14(1), 2349–2353. <https://doi.org/10.5555/2567709.2567736>.
- Deng, J., Cummins, N., Schmitt, M., Qian, K., Ringeval, F., & Schuller, B. (2017). Speech-based Diagnosis of Autism Spectrum Condition by Generative Adversarial Network Representations. In *Proceedings of the 2017 International Conference on Digital Health - DH '17*, 53–57, New York, New York, USA. ACM Press. <https://doi.org/10.1145/3079452.3079492>.
- Dongxin Xu, Gilkerson, J., Richards, J., Yapanel, U., & Gray, S. (2009). Child vocalization composition as discriminant information for automatic autism detection. In *2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2518–2522. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2009.5334846>.
- Donnellan, A. M., Hill, D. A., & Leary, M. R. (2013). Rethinking autism: implications of sensory and movement differences for understanding and support. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 6, 124. <https://doi.org/10.3389/fnint.2012.00124>.
- Drey, T., Janek, J., Lang, J., Puschmann, D., Rietzler, M., & Rukzio, E. (2022). SpARKlingPaper: Enhancing Common Pen- And Paper-Based Handwriting Training for Children by Digitally Augmenting Papers Using a Tablet Screen. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 6(3), 1–29. <https://doi.org/10.1145/3550337>.
- Elder, J. H., Kreider, C. M., Brasher, S. N., & Ansell, M. (2017). Clinical impact of early diagnosis of autism on the prognosis and parent–child relationships. *Psychology research and behavior management*, 283–292. <https://doi.org/10.2147/PRBM.S117499>.
- Espenhahn, S., Godfrey, K. J., Kaur, S., McMorris, C., Murias, K., Tommerdahl, M., Bray, S., & Harris, A. D. (2022). Atypical Tactile Perception in Early Childhood Autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*. <https://doi.org/10.1007/s10803-022-05570-7>.
- Falck-Ytter, T., Bölte, S., & Gredebäck, G. (2013). Eye tracking in early autism research. *Journal of neurodevelopmental disorders*, 5(1), 28. Publisher: BioMed Central, <https://doi.org/10.1186/1866-1955-5-28>.
- Fombonne, E., Marcin, C., Manero, A. C., Bruno, R., Diaz, C., Villalobos, M., Ramsay, K., & Nealy, B. (2016). Prevalence of Autism Spectrum Disorders in Guanajuato, Mexico: The Leon survey. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 46(5), 1669–1685. <https://doi.org/10.1007/s10803-016-2696-6>.

- Foss-Feig, J. H., Heacock, J. L., & Cascio, C. J. (2012). Tactile responsiveness patterns and their association with core features in autism spectrum disorders. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 6(1), 337–344. Publisher: NIH Public Access, <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2011.06.007>.
- Gabele, M., Schröer, S., Husslein, S., & Hansen, C. (2019). An AR Sandbox as a Collaborative Multiplayer Rehabilitation Tool for Children with ADHD. Publisher: Gesellschaft für Informatik e.V., <https://doi.org/10.18420/MUC2019-WS-632>.
- Gao, J., Zhou, L., Dong, M., & Zhang, F. (2018). Expressive Plant. In *Proceedings of the 2018 ACM International Joint Conference and 2018 International Symposium on Pervasive and Ubiquitous Computing and Wearable Computers - UbiComp '18*, 46–49, New York, New York, USA. ACM Press. <https://doi.org/10.1145/3267305.3267588>.
- Gómez-de Mariscal, E., Guerrero, V., Sneider, A., Jayatilaka, H., Phillip, J. M., Wirtz, D., & Muñoz-Barrutia, A. (2021). Use of the p-values as a size-dependent function to address practical differences when analyzing large datasets. *Scientific reports*, 11(1), 20942. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00199-5>.
- Gong, Y., Yatawatte, H., Poellabauer, C., Schneider, S., & Latham, S. (2018). Automatic Autism Spectrum Disorder Detection Using Everyday Vocalizations Captured by Smart Devices. In *Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Bioinformatics, Computational Biology, and Health Informatics - BCB '18*, 465–473, New York, New York, USA. ACM Press. <https://doi.org/10.1145/3233547.3233574>.
- González-Cortés, T., Gutiérrez-Contreras, E., Espino-Silva, P. K., Cruz, J. H.-S., Álvarez Cruz, D., Rosales-González, C. C., Sida-Godoy, C., Nava-Hernández, M. P., López-Márquez, F. C., & Ruiz-Flores, P. (2019). Clinical Profile of Autism Spectrum Disorder in a Pediatric Population from Northern Mexico. *Journal of Autism and Developmental Disorders* 49:11, 49(11), 4409–4420. Publisher: Springer, <https://doi.org/10.1007/S10803-019-04154-2>.
- Goodwin, M. S., Intille, S. S., Velicer, W. F., & Groden, J. (2008). Sensor-enabled detection of stereotypical motor movements in persons with autism spectrum disorder. In *Proceedings of the 7th international conference on Interaction design and children - IDC '08*, 109, New York, New York, USA. ACM Press. <https://doi.org/10.1145/1463689.1463733>.
- Grabs, S. (2009). Hybrid interaction on interactive surfaces. *Interactive Surfaces*, 30. <https://www.medien.informatik.uni-muenchen.de/pubdb/publications/pub/hennecke2009IShs/hennecke2009IShs.pdf#page=38>.
- Großekathöfer, U., Manyakov, N. V., Mihajlović, V., Pandina, G., Skalkin, A., Ness, S., Bangarter, A., & Goodwin, M. S. (2017). Automated Detection of Stereotypical Motor Movements in Autism Spectrum Disorder Using Recurrence Quantification Analysis. *Frontiers in neuroinformatics*, 11(February), 9. <https://doi.org/10.3389/fninf.2017.00009>.
- Guinchat, V., Chamak, B., Bonniau, B., Bodeau, N., Perisse, D., Cohen, D., & Danion, A. (2012). Very early signs of autism reported by parents include many concerns not specific to autism criteria. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 6(2), 589–601. Publisher: Elsevier, <https://doi.org/10.1016/J.RASD.2011.10.005>.
- Guneyasu Ozgur, A., Özgür, A., Asselborn, T., Johal, W., Yadollahi, E., Bruno, B., Skweres, M., & Dillenbourg, P. (2020). Iterative Design and Evaluation of a Tangible Robot-Assisted Handwriting Activity for Special Education. *Frontiers in Robotics and AI*, 7, 29. <https://doi.org/10.3389/frbot.2020.00029>.

- Haghighi, N., Vladis, N., Liu, Y., & Satyanarayan, A. (2020). The Effectiveness of Haptic Properties Under Cognitive Load: An Exploratory Study. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.00372>.
- Hall, L., Hume, C., & Tazzyman, S. (2016). Five Degrees of happiness: Effective Smiley Face Likert scales for evaluating with children. In *Proceedings of IDC 2016 - The 15th International Conference on Interaction Design and Children*, 311–321, New York, New York, USA. Association for Computing Machinery, Inc. <https://doi.org/10.1145/2930674.2930719>.
- Hannant, P., Tavassoli, T., & Cassidy, S. (2016). The role of sensorimotor difficulties in autism spectrum conditions. *Frontiers in neurology*, 7, 124. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fneur.2016.00124>.
- Hedley, D., Young, R., Angelica, M., Gallegos, J., & Marcin Salazar, C. (2010). Cross-cultural evaluation of the Autism Detection in Early Childhood (ADEC) in Mexico. *Autism : the international journal of research and practice*, 14(2), 93–112. Publisher: SAGE Publications Sage UK: London, England, <https://doi.org/10.1177/1362361309347676>.
- Hicks, J. L., Althoff, T., Sobic, R., Kuhar, P., Bostjancic, B., King, A. C., Leskovec, J., & Delp, S. L. (2019). Best practices for analyzing large-scale health data from wearables and smartphone apps. *npj Digital Medicine*, 2(1). Publisher: Springer Science and Business Media LLC, <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0121-1>.
- Israr, A., Zhao, S., Schwalje, K., Klatzky, R., & Lehman, J. (2014). Feel effects: Enriching storytelling with haptic feedback. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 11(3). <https://doi.org/10.1145/2641570>.
- Jovic, A., Brkic, K., & Bogunovic, N. (2015). A review of feature selection methods with applications. In *2015 38th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 1200–1205, Opatija, Croatia. IEEE. <https://doi.org/10.1109/MIPRO.2015.7160458>.
- Jullien, S. (2021). Screening for autistic spectrum disorder in early childhood. *BMC Pediatrics* 2021 21:1, 21(1), 1–9. Publisher: BioMed Central, <https://doi.org/10.1186/S12887-021-02700-5>.
- Jung, I. (2017). Some facts that you might be unaware of about the p-value. *Archives of Plastic Surgery*, 44(02), 93–94. <https://doi.org/10.5999/aps.2017.44.2.93>.
- Kanhirakadavath, M. R. & Chandran, M. S. M. (2022). Investigation of Eye-Tracking Scan Path as a Biomarker for Autism Screening Using Machine Learning Algorithms. *Diagnostics*, 12(2), 518. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12020518>.
- Kanne, S. M., Carpenter, L. A., & Warren, Z. (2018). Screening in toddlers and preschoolers at risk for autism spectrum disorder: Evaluating a novel mobile-health screening tool. *Autism Research*, 11(7), 1038–1049. Publisher: John Wiley and Sons Inc., <https://doi.org/10.1002/aur.1959>.
- Khaledi, H., Aghaz, A., Mohammadi, A., Dadgar, H., & Meftahi, G. H. (2022). The relationship between communication skills, sensory difficulties, and anxiety in children with autism spectrum disorder. *Middle East Current Psychiatry*, 29(1), 69. <https://doi.org/10.1186/s43045-022-00236-7>.
- Koirala, A., Van Hecke, A., Yu, Z., Koth, K. A., Zheng, Z., & Schiltz, H. (2019). An exploration of using virtual reality to assess the sensory abnormalities in children with autism spectrum disorder. In *Proceedings of the 18th ACM International Conference on Interaction Design and Children, IDC 2019*, 293–300. Association for Computing Machinery, Inc. <https://doi.org/10.1145/3311927.3323118>.

- Krichmar, J. L. & Chou, T. S. (2018). A tactile robot for developmental disorder therapy. In *ACM International Conference Proceeding Series*. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3183654.3183657>.
- Kruijff, E., Biswas, S., Trepkowski, C., Maiero, J., Ghinea, G., & Stuerzlinger, W. (2019). Multilayer haptic feedback for pen-based tablet interaction. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, (Chi), 1–14. ISBN: 9781450359702, <https://doi.org/10.1145/3290605.3300373>.
- Kuchenbecker, K. J. (2018). Haptics and Haptic Interfaces. *Encyclopedia of Robotics*, 1–9. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41610-1_19-1.
- Kursa, M. B. & Rudnicki, W. R. (2010). Feature Selection with the Boruta Package. *Journal Of Statistical Software*, 36(11), 1–13. ISBN: 1548-7660, <https://doi.org/Vol.36,Issue11,Sep2010>.
- Li, B., Barney, E., Hudac, C., Nuechterlein, N., Ventola, P., Shapiro, L., & Shic, F. (2020). Selection of eye-tracking stimuli for prediction by sparsely grouped input variables for neural networks: Towards biomarker refinement for autism. In *Eye Tracking Research and Applications Symposium (ETRA)*. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3379155.3391334>.
- Lord, C., Rutter, M., & Le Couteur, A. (1994). Autism Diagnostic Interview-Revised: a revised version of a diagnostic interview for caregivers of individuals with possible pervasive developmental disorders. *Journal of autism and developmental disorders*, 24(5), 659–85.
- Lu, S.-C., Rowe, P., Tachtatzis, C., Andonovic, I., Anzulewicz, A., Sobota, K., & Delafield-Butt, J. (2022). Swipe kinematic differences in young children with autism spectrum disorders are task- and age-dependent: A smart tablet game approach. *Brain Disorders*, 5, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.dscb.2022.100032>.
- Lyakso, E., Frolova, O., & Matveev, Y. (2023). Voice Features as the Diagnostic Marker of Autism. 16(7), 6. <https://doi.org/10.1038/s41398-023-02554-8>.
- MacLean, K. (2000). Designing with haptic feedback. In *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*, volume 1, 783–788. IEEE. Issue: April, <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2000.844146>.
- Mahmoudi-Nejad, A., Moradi, H., & Pouretamad, H.-R. (2017). The Differences Between Children with Autism and Typically Developed Children in Using a Hand-Eye-Coordination Video Game. 256–264. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67585-5_27.
- Marco, E. J., Hinkley, L. B., Hill, S. S., & Nagarajan, S. S. (2011). Sensory processing in autism: A review of neurophysiologic findings. *Pediatric Research*, 69(5 PART 2), 48–54. Publisher: Nature Publishing Group, <https://doi.org/10.1203/PDR.0b013e3182130c54>.
- McKernan, E. P., Wu, Y., & Russo, N. (2020). Sensory Overresponsivity as a Predictor of Amplitude Discrimination Performance in Youth with ASD. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 50(9), 3140–3148. <https://doi.org/10.1007/s10803-019-04013-0>.
- Meister, S., Deiters, W., & Becker, S. (2016). Digital health and digital biomarkers – enabling value chains on health data. *Current Directions in Biomedical Engineering*, 2(1), 577–581. Publisher: De Gruyter, <https://doi.org/10.1515/cdbme-2016-0128>.
- Mercado, J., Escobedo, L., & Tentori, M. (2021). A BCI video game using neurofeedback improves the attention of children with autism. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 15(3), 273–281. <https://doi.org/10.1007/s12193-020-00339-7>.

- Micai, M., Fulceri, F., Caruso, A., Guzzetta, A., Gila, L., & Scattoni, M. L. (2020). Early behavioral markers for neurodevelopmental disorders in the first 3 years of life: An overview of systematic reviews. *Neuroscience Biobehavioral Reviews*, 116, 183–201. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.06.027>.
- Mikkelsen, M., Wodka, E. L., Mostofsky, S. H., & Puts, N. A. (2018). Autism spectrum disorder in the scope of tactile processing. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 29, 140–150. Publisher: Elsevier Ltd, <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2016.12.005>.
- Naito, N., Kikuchi, M., Yoshimura, Y., Kumazaki, H., Kitagawa, S., Ikeda, T., Hasegawa, C., Saito, D. N., Tomiyama, S., & Minabe, Y. (2019). Atypical body movements during night in young children with autism spectrum disorder: a pilot study. *Scientific Reports*, 9(1), 6999. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43397-y>.
- Nakano, T., Tanaka, K., Endo, Y., Yamane, Y., Yamamoto, T., Nakano, Y., Ohta, H., Kato, N., & Kitazawa, S. (2010). Atypical gaze patterns in children and adults with autism spectrum disorders dissociated from developmental changes in gaze behaviour. *Proceedings. Biological sciences*, 277(1696), 2935–43. Publisher: The Royal Society, <https://doi.org/10.1098/rspb.2010.0587>.
- Okamoto, M. & Murao, K. (2021). Multi-touch interaction generation device by spatiotemporally switching electrodes. *Electronics*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/electronics10121475>.
- Oliveira, J. S., Franco, F. O., Revers, M. C., Silva, A. F., Portolese, J., Brentani, H., Machado-Lima, A., & Nunes, F. L. S. (2021). Computer-aided autism diagnosis based on visual attention models using eye tracking. *Scientific Reports*, 11(1), 10131. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89023-8>.
- Park, W., Babushkin, V., Tahir, S., & Eid, M. (2021). Haptic Guidance to Support Handwriting for Children With Cognitive and Fine Motor Delays. *IEEE Transactions on Haptics*, 14(3), 626–634. <https://doi.org/10.1109/TOH.2021.3068786>.
- Park, W., Korres, G., Moonesinghe, T., & Eid, M. (2019). Investigating Haptic Guidance Methods for Teaching Children Handwriting Skills. *IEEE Transactions on Haptics*, 12(4), 461–469. <https://doi.org/10.1109/TOH.2019.2922284>.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830. <https://doi.org/10.5555/1953048.2078195>.
- Perochon, S., Matias Di Martino, J., Carpenter, K. L. H., Compton, S., Davis, N., Espinosa, S., Franz, L., Rieder, A. D., Sullivan, C., Sapiro, G., & Dawson, G. (2023). A tablet-based game for the assessment of visual motor skills in autistic children. *npj Digital Medicine*, 6(1), 17. <https://doi.org/10.1038/s41746-023-00762-6>.
- Ping, H., Stoyanovich, J., & Howe, B. (2017). ACM Reference format: Haoyue Ping, Julia Stoyanovich, and Bill Howe. ISBN: 9781450352826, <https://doi.org/10.1145/3085504.3091117>.
- Pudjihartono, N., Fadason, T., Kempa-Liehr, A. W., & O'Sullivan, J. M. (2022). A Review of Feature Selection Methods for Machine Learning-Based Disease Risk Prediction. *Frontiers in Bioinformatics*, 2.
- Puts, N. A. J., Wodka, E. L., Tommerdahl, M., Mostofsky, S. H., & Edden, R. A. E. (2014a). Impaired tactile processing in children with autism spectrum disorder. *Journal of Neurophysiology*, 111(9), 1803–1811. Publisher: American Physiological Society, <https://doi.org/10.1152/jn.00890.2013>.

- Puts, N. A. J., Wodka, E. L., Tommerdahl, M., Mostofsky, S. H., & Edden, R. A. E. (2014b). Impaired tactile processing in children with autism spectrum disorder. *Journal of Neurophysiology*, 111(9), 1803–1811. <https://doi.org/10.1152/jn.00890.2013>.
- Pyun, K. R., Rogers, J. A., & Ko, S. H. (2022). Materials and devices for immersive virtual reality. *Nature Reviews Materials*, 7(11), 841–843. <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00501-5>.
- Rad, N. M. & Furlanello, C. (2017). Applying Deep Learning to Stereotypical Motor Movement Detection in Autism Spectrum Disorders. *IEEE International Conference on Data Mining Workshops, ICDMW*, 1235–1242. ISBN: 9781509054725, <https://doi.org/10.1109/ICDMW.2016.0178>.
- Rafique, I., Fatima, K., Dastagir, A., Mahmood, S., & Hussain, M. (2019). Autism Identification and Learning Through Motor Gesture Patterns. In *2019 International Conference on Innovative Computing (ICIC)*, 1–7, Lahore, Pakistan. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIC48496.2019.8966740>.
- Raisamo, R., Patomäki, S., Hasu, M., & Pasto, V. (2007). Design and evaluation of a tactile memory game for visually impaired children. *Interacting with Computers*, 19(2), 196–205. Publisher: Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2006.08.011>.
- Read, J. C. (2008). Validating the Fun Toolkit: an instrument for measuring children's opinions of technology. *Cognition, Technology & Work*, 10(2), 119–128. <https://doi.org/10.1007/s10111-007-0069-9>.
- Ribeiro, F. S., Braun Janzen, T., Passarini, L., & Vanzella, P. (2021). Exploring Changes in Musical Behaviors of Caregivers and Children in Social Distancing During the COVID-19 Outbreak. *Frontiers in Psychology*, 12. Publisher: Frontiers Media S.A., <https://doi.org/10.3389/FPSYG.2021.633499/FULL>.
- Robertson, C. E. & Baron-Cohen, S. (2017). Sensory perception in autism. *Nature Reviews Neuroscience*, 18(11), 671–684. <https://doi.org/10.1038/nrn.2017.112>.
- Rodríguez, J. L., Velázquez, R., Del-Valle-soto, C., Gutiérrez, S., Varona, J., & Enríquez-Zarate, J. (2019). Active and passive haptic perception of shape: Passive haptics can support navigation. *Electronics (Switzerland)*, 8(3), 1–12. <https://doi.org/10.3390/electronics8030355>.
- Rubine, D. (1991). Specifying gestures by example. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 25(4), 329–337. <https://doi.org/10.1145/127719.122753>.
- Salki, N., vraka, E., Trtak, N., & Krnjojelac, L. (2022). Difficulties of sensory integration of the tactile sensory system of children with visual impairment. *International Journal of Medical Reviews and Case Reports*, (0), 1. <https://doi.org/10.5455/IJMRCR.172-1645730510>.
- Santos, J. F., Brosh, N., Falk, T. H., Zwaigenbaum, L., Bryson, S. E., Roberts, W., Smith, I. M., Szatmari, P., & Brian, J. A. (2013). Very early detection of Autism Spectrum Disorders based on acoustic analysis of pre-verbal vocalizations of 18-month old toddlers. In *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 7567–7571. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2013.6639134>.
- Seifi, H., Zhang, K., & MacLean, K. E. (2015). VibViz: Organizing, visualizing and navigating vibration libraries. In *IEEE World Haptics Conference (WHC)*. <https://doi.org/10.1109/WHC.2015.7177722>.
- Serrano, K. J., Coa, K. I., Yu, M., Wolff-Hughes, D. L., & Atienza, A. A. (2017). Characterizing user engagement with health app data: a data mining approach. *Translational Behavioral Medicine*, 7(2), 277–285. Publisher: Springer New York LLC, <https://doi.org/10.1007/s13142-017-0508-y>.

- Solorio-Fernández, S., Carrasco-Ochoa, J. A., & Martínez-Trinidad, J. F. (2020). A review of unsupervised feature selection methods. *Artificial Intelligence Review*, 53(2), 907–948. <https://doi.org/10.1007/s10462-019-09682-y>.
- Talkar, T., Williamson, J. R., Hannon, D. J., Rao, H. M., Yuditskaya, S., Claypool, K. T., Sturim, D., Nowinski, L., Saro, H., Stamm, C., Mody, M., McDougale, C. J., & Quatieri, T. F. (2020). Assessment of Speech and Fine Motor Coordination in Children with Autism Spectrum Disorder. *IEEE Access*, 8, 127535–127545. Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007348>.
- Teranishi, A., Mulumba, T., Karafotias, G., Alja'am, J. M., & Eid, M. (2017). Effects of full/partial haptic guidance on handwriting skills development. In *2017 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, 113–118, Munich, Germany. IEEE. <https://doi.org/10.1109/WHC.2017.7989886>.
- Ternes, D. & Maclean, K. E. (2008). LNCS 5024 - Designing Large Sets of Haptic Icons with Rhythm. 199–208. Publication Title: LNCS Volume: 5024, https://doi.org/10.1007/978-3-540-69057-3_24.
- Troiano, G. M., Pedersen, E. W., & Hornbaek, K. (2014). User-Defined Gestures for Elastic, Deformable Displays. <https://doi.org/10.1145/2598153.2598184>.
- Tuman, J. P., Roth-Johnson, D., Baker, D. L., & Vecchio, J. L. (2010). Autism and special education policy in Mexico. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6435-8_102236-1.
- Turi, M., Burr, D. C., & Binda, P. (2018). Pupillometry reveals perceptual differences that are tightly linked to autistic traits in typical adults. *eLife*, 7, e32399. Publisher: eLife Sciences Publications Limited, <https://doi.org/10.7554/eLife.32399>.
- Vargas-Cuentas, N. I., Roman-Gonzalez, A., Gilman, R. H., Barrientos, F., Ting, J., Hidalgo, D., Jensen, K., & Zimic, M. (2017). Developing an eye-tracking algorithm as a potential tool for early diagnosis of autism spectrum disorder in children. *PLOS ONE*, 12(11), e0188826. Publisher: Public Library of Science, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188826>.
- Wan, G., Kong, X., Sun, B., Yu, S., Tu, Y., Park, J., Lang, C., Koh, M., Wei, Z., Feng, Z., Lin, Y., & Kong, J. (2019). Applying Eye Tracking to Identify Autism Spectrum Disorder in Children. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 49(1). <https://doi.org/10.1007/s10803-018-3690-y>.
- Wang, S., Jiang, M., Duchesne, X. M., Laugeson, E. A., Kennedy, D. P., Adolphs, R., & Zhao, Q. (2015). Atypical Visual Saliency in Autism Spectrum Disorder Quantified through Model-Based Eye Tracking. *Neuron*, 88(3), 604–616. Publisher: Cell Press, <https://doi.org/10.1016/J.NEURON.2015.09.042>.
- Wee, C., Yap, K. M., & Lim, W. N. (2021). Haptic interfaces for virtual reality: Challenges and research directions. *IEEE Access*, 9, 112145–112162. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3103598>.
- Xu, Z., Bai, K., & Zhu, S. (2012). TapLogger: inferring user inputs on smartphone touchscreens using on-board motion sensors. In *Proceedings of the fifth ACM conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks*, WISEC '12, 113–124, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/2185448.2185465>.
- Yaneva, V., Ha, L. A., Eraslan, S., Yesilada, Y., & Mitkov, R. (2020). Detecting High-Functioning Autism in Adults Using Eye Tracking and Machine Learning. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28(6), 1254–1261. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.2991675>.

- Yannier, N., Israr, A., Lehman, J. F., & Klatzky, R. L. (2015). Feel sleeve: Haptic Feedback to enhance early reading. In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, volume 2015-April, 1015–1024. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702396>.
- Zeng, H., Qi, Y., & Lu, Y. (2023). Toubot: A Pair of Wearable Haptic Robots Linking Left-behind Children and Their Parents Emotionally. In *Companion of the 2023 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, 816–819, Stockholm Sweden. ACM. <https://doi.org/10.1145/3568294.3580191>.
- Zhang, Y., Dong, Z., Phillips, P., Wang, S., Ji, G., Yang, J., & Yuan, T.-F. (2015). Detection of subjects and brain regions related to Alzheimer's disease using 3D MRI scans based on eigenbrain and machine learning. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 9, 66. Publisher: Frontiers Media SA, <https://doi.org/10.3389/fncom.2015.00066>.
- Zhang, Y. & Ling, C. (2018). A strategy to apply machine learning to small datasets in materials science. *npj Computational Materials*, 4(1), 28–33. Publisher: Springer US, <https://doi.org/10.1038/s41524-018-0081-z>.
- Zhao, H., Zheng, Z., Swanson, A., Weitlauf, A., Warren, Z., & Sarkar, N. (2018). Design of a Haptic-Gripper Virtual Reality System (Hg) for Analyzing Fine Motor Behaviors in Children with Autism. *ACM Transactions on Accessible Computing*, 11(4), 1–21. <https://doi.org/10.1145/3231938>.
- Zuckerman, K. E., Lindly, O. J., & Sinche, B. K. (2015). Parental Concerns, Provider Response, and Timeliness of Autism Spectrum Disorder Diagnosis. *The Journal of Pediatrics*, 166(6), 1431–1439.e1. Publisher: Mosby Inc., <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2015.03.007>.