

El desafío de comunicar: tiempo de procesamiento y pérdida de información en la comunicación asistida

Eje temático: Ciencia, tecnología y comunicación aumentativa en la educación y la inclusión

Autores: Juana González Robacio¹ – Agustina Giorgetti² – Karina Rodríguez³ – Gustavo Gasaneo⁴

Institución: Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur – IFISUR (CONICET-UNS)

Palabras clave: lenguaje – comunicación aumentativa – entropía – grados de libertad – discapacidad motora

Resumen

El lenguaje constituye uno de los desarrollos más complejos de la actividad humana. En este sentido, resulta altamente significativo, ya que es el medio a través del cual se construye el pensamiento, la interacción social y la identidad de las personas. La oralidad es una de las formas de expresión, aun cuando no la única. Existen millones de personas en el mundo que presentan discapacidades que dificultan o imposibilitan la comunicación oral. Este trabajo analiza, utilizando herramientas derivadas de la física, la estadística y la teoría de la información, la pérdida de información y la disminución de la velocidad comunicativa en la producción de relatos mediante distintas formas de producción de información, algunos de ellos similares a los que se utilizan en los sistemas alternativos y aumentativos de comunicación (SAAC).

El estudio compara cuatro modalidades de producción: oralidad, tipeo con dos manos, tipeo con un dedo y comunicación mediante un rastreador ocular (*eye tracker*). A partir del registro de tiempos, número y tipo de palabras, se aplicaron métricas de la teoría de la información —entropía de Shannon, exponentes Hurst— para cuantificar comparativamente la información producida y la eficiencia lingüística de cada modalidad. Los resultados muestran que, a medida que disminuyen los grados de libertad motora, se reduce de manera proporcional la riqueza léxica y la velocidad de transmisión. La producción de un relato mediante los movimientos oculares con un *eye tracker*, con solo uno o dos grados de libertad, alcanza apenas el 7 % de la tasa informativa de la modalidad oral. Estos hallazgos evidencian la necesidad de diseñar entornos educativos, sociales y tecnológicos que compensen estas limitaciones y favorezcan una comunicación más equitativa.

¹ Licenciada en Física, Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur.

The challenge of communicating: processing time and information loss in assisted communication

Thematic axis: Science, technology, and augmentative communication in education and inclusion

Authors: Juana González Robacio¹ – Agustina Giorgetti² – Karina Rodríguez³ – Gustavo Gasaneo⁴

Institution: Department of Physics, Universidad Nacional del Sur – IFISUR (CONICET-UNS)

Keywords: language – augmentative communication – entropy – degrees of freedom – motor disability

Abstract

Language constitutes one of the most complex developments of human activity. In this regard, it is highly significant as it is the medium through which thought, social interaction, and personal identity are constructed. Orality is one of the forms of expression, though not the only one. Millions of people worldwide have disabilities that hinder or preclude oral communication. Utilizing tools derived from physics, statistics, and information theory, this work analyzes information loss and the reduction in communication speed during narrative production across different methods of information generation, some of which are similar to those used in augmentative and alternative communication (AAC) systems.

The study compares four production modalities: orality, two-handed typing, single-finger typing, and communication via an eye tracker. Based on the recording of times, word count, and word types, information theory metrics—such as Shannon entropy and Hurst exponents—were applied to quantitatively compare the produced information and the linguistic efficiency of each modality.

The results show that as motor degrees of freedom decrease, lexical richness and transmission speed are proportionally reduced. Narrative production through eye movements using an eye tracker, which involves only one or two degrees of freedom,

1 Licenciada en Física, Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Buenos Aires.

2 Licenciada en Psicología y becaria doctoral del CONICET, Universidad Nacional del Sur. Investiga y desarrolla herramientas basadas en tecnología de seguimiento ocular, para la evaluación y el apoyo a la comunicación en personas con necesidades complejas de movilidad y comunicación. Sus actividades se centran en neuropsicología, aprendizaje, desarrollo cognitivo y lenguaje.

3 Doctora en Física y profesora adjunta, Dpto. de Física, Universidad Nacional del Sur. Es directora del Área de evaluación neurocognitiva y habilidades visuales del Centro Integral de Neurociencias Aplicadas en Bahía Blanca, Buenos Aires. Ha supervisado estudiantes de grado y posgrado y publicado en revistas de prestigio internacional. Su experiencia incluye modelado de procesos lectores, cognitivos y visuales con registro de los movimientos oculares (eye tracking).

4 Doctor en Física y profesor titular de la Universidad Nacional del Sur (UNS) e investigador principal del CONICET. Realizó una estancia postdoctoral en la Universidad de Tennessee, Estados Unidos, y actualmente dirige distintos proyectos de investigación. En 2017 fundó el Centro Integral de Neurociencias Aplicadas (CINA) especializado en investigación y práctica clínica en salud mental. En 2018 fundó Neufitech SRL. Ha supervisado a numerosos estudiantes de grado y posgrado y publicado en revistas de prestigio internacional. Su experiencia incluye el modelado de sistemas físicos, biológicos y conductuales, así como estudios con seguimiento ocular (eye tracking).

reaches barely 7% of the information rate of the oral modality. These findings highlight the need to design educational, social, and technological environments that compensate for these limitations and foster more equitable communication.

Introducción

La comunicación, un pilar fundamental de la condición humana, es esencial para la construcción del conocimiento, la identidad y la interacción social. Sin embargo, un segmento considerable de la población enfrenta limitaciones en la producción del lenguaje oral. Datos del INDEC (2018) revelan que, en Argentina, el 1 % de las personas mayores de seis años experimentan dificultades en el habla o la comunicación, y más de 375.000 carecen de la capacidad de comunicarse oralmente.

En respuesta a estas barreras, los Sistemas Alternativos y Aumentativos de Comunicación (SAAC) de alta tecnología emergen como una solución vital, ofreciendo modalidades de comunicación basadas en pictogramas y/o texto escrito que pueden ser verbalizados. Estos sistemas son accesibles a través de teclados, botones o dispositivos de seguimiento ocular, facilitando la expresión y la participación social (Light et al., 2019). No obstante, la interacción con estos sistemas impone una carga cognitiva y motora significativa, lo que puede afectar la fluidez y la complejidad del mensaje. La construcción de la información, en estos casos, se externaliza y se desarrolla de manera secuencial fuera del cerebro. Particularmente, en el seguimiento ocular, la entrada de información al dispositivo de comunicación se logra mediante el desplazamiento del cursor con los ojos y la simulación de la pulsación de botones, a menudo basada en un tiempo de espera.

El presente estudio se propone analizar la pérdida de información inherente a la generación del lenguaje bajo diferentes grados de libertad motora, estableciendo una comparación entre la modalidad oral y diversas formas de comunicación asistida. Para ello, se integrarán herramientas conceptuales y metodológicas de la física, la neurociencia y la lingüística estadística, con el objetivo de cuantificar la eficiencia comunicativa y explorar las implicaciones cognitivas y sociales de estas restricciones.

Objetivos

Objetivo General

Cuantificar la pérdida de información y la disminución de la velocidad comunicativa en relatos generados con modalidades de distintos grados de libertad motora; y comparar la modalidad oral con las alternativas no orales.

Objetivos específicos

- Estimar la eficiencia lingüística de las producciones mediante herramientas de la física, la estadística y la teoría de la información (entropía de Shannon, exponente Hurst).
- Analizar cuantitativamente las dificultades comunicacionales presentes en contextos de no oralidad, promoviendo la reflexión y el fortalecimiento de las estrategias inclusivas en el ámbito educativo y social.

Marco Teórico

La comunicación es un derecho humano esencial (Cotrufo, 2020) y un fenómeno complejo que integra dimensiones cognitivas, motoras y sociales, cuya limitación afecta la interacción y el desarrollo del pensamiento (Romski & Sevcik, 2005). En física, los grados de libertad describen el conjunto mínimo de variables necesarias para definir el estado dinámico de un sistema (Goldstein et al., 2002), principio que aplicado a la biomecánica y la neurociencia del movimiento permite analizar la coordinación corporal (Bernstein, 1967). Así, el habla se concibe como un sistema con múltiples grados de libertad que exige la sincronización de procesos respiratorios, fonatorios, articulatorios y gestuales (Maeda, 1990). Al restringirse la motricidad —por ejemplo, al limitarla al movimiento ocular o a un solo dedo—, se reduce drásticamente la riqueza expresiva y la complejidad estructural del lenguaje. Este trabajo propone abordar el lenguaje como un sistema físico de generación de información, donde la entropía de Shannon (1948) y el exponente de Hurst (Montemurro & Zanette, 2011) permiten cuantificar su orden, variabilidad y persistencia, articulando un marco teórico para entender la comunicación como fenómeno emergente regido por restricciones físicas y principios estadísticos.

Metodología

Participantes

El presente estudio se diseñó con el propósito de analizar de manera cuantitativa cómo las restricciones motoras influyen en la producción del lenguaje, observando la pérdida de información que ocurre cuando se reducen los grados de libertad disponibles durante la comunicación. Para ello, se seleccionó una muestra de 30 personas adultas, sin restricciones de edad ni antecedentes de experiencia en el uso comunicación asistida con *eye tracking*. La composición fue equilibrada en cuanto al género (50 % femenino y 50 % masculino), y la participación se realizó de forma voluntaria.

Herramientas

Para la implementación del experimento se emplearon diversos recursos tecnológicos y audiovisuales diseñados para registrar y analizar la producción de lenguaje en diferentes condiciones motoras.

En primer lugar, se utilizó un video breve de aproximadamente dos minutos de duración, en el que se presenta una secuencia protagonizada por dos personajes animados (París & Seno, 2019). El contenido fue seleccionado por su neutralidad semántica y su estructura narrativa simple, con el propósito de favorecer la generación espontánea de un relato coherente y comparable entre participantes.

Entre las herramientas utilizadas se incluyó un dispositivo de rastreo ocular (*eye tracker*) con una frecuencia de muestreo de 90 Hz, capaz de detectar en tiempo real la posición y el movimiento de los ojos sobre la pantalla durante la ejecución de la tarea experimental. Complementariamente, se utilizó el software de código abierto Optikey Pro, diseñado para facilitar la interacción con la computadora mediante el seguimiento ocular. Este programa permite que las personas con discapacidades físicas o motoras significativas escriban y se comuniquen a través del movimiento de sus ojos, seleccionando letras,

palabras o frases en un teclado virtual. La integración entre el *eye tracker* y Optikey posibilita la simulación del proceso de escritura mediante movimientos oculares, constituyendo así una interfaz comunicativa alternativa que reproduce condiciones reales de comunicación asistida.

Todas las herramientas fueron calibradas y verificadas antes de cada sesión experimental, a fin de garantizar la precisión de los registros y la confiabilidad de las mediciones obtenidas.

Procedimiento

La experiencia consistió en que cada participante visualizara un video (2 minutos), el cual presenta una secuencia protagonizada por dos personajes animados. Finalizada la proyección del video, cada persona debía realizar un relato de la historia que contaba el video en cuatro modalidades: oralidad, tipeo con dos manos, tipeo con un solo dedo, comunicación con *eye tracker* mediante el software Optikey Pro. No se fijaron condiciones de tiempo o número de palabras en los relatos producidos. Los relatos fueron grabados y transcritos, obteniendo para cada modalidad los tiempos totales, el número de palabras, las frecuencias léxicas y las distribuciones semánticas.

Resultados

El análisis cuantitativo muestra que la restricción progresiva de los grados de libertad motora reduce la velocidad, cantidad y estructura de la información producida. Un grado de libertad refiere al número de variables motrices independientes disponibles para ejecutar una tarea (Bernstein, 1967; Parrell et al., 2019). La modalidad oral presenta entre veinte y treinta grados de libertad, el tipeo con dos manos entre doce y catorce, con un dedo entre tres y cuatro, y la escritura con rastreador ocular apenas uno o dos. Esta jerarquía vincula la dimensión motora con la capacidad de generar información lingüística. Las producciones narrativas evidencian una disminución sistemática en la velocidad: oralidad 142 palabras por minuto, tipeo con dos manos 34, con un dedo 26 y escritura ocular 5, lo que implica una reducción del 96 % respecto de la oralidad (véase Tabla 1). Las pruebas estadísticas (Dwass–Steel–Critchlow–Fligner) confirman diferencias significativas entre modalidades ($p < .001$), salvo entre los dos tipeos. La menor dispersión en el *eye tracker* refleja la homogeneidad impuesta por la restricción motora extrema. Esta reducción en la velocidad no responde solo a un factor técnico de la interfaz, sino que refleja una reorganización cognitiva más profunda: al restringirse el canal motor, el sujeto tiende a simplificar las estructuras sintácticas, acortar las oraciones y seleccionar únicamente los elementos léxicos esenciales para mantener la coherencia. Así, la comunicación no solo se ralentiza, sino que también se transforma estructuralmente, volviéndose más breve y menos variable.

Tabla 1

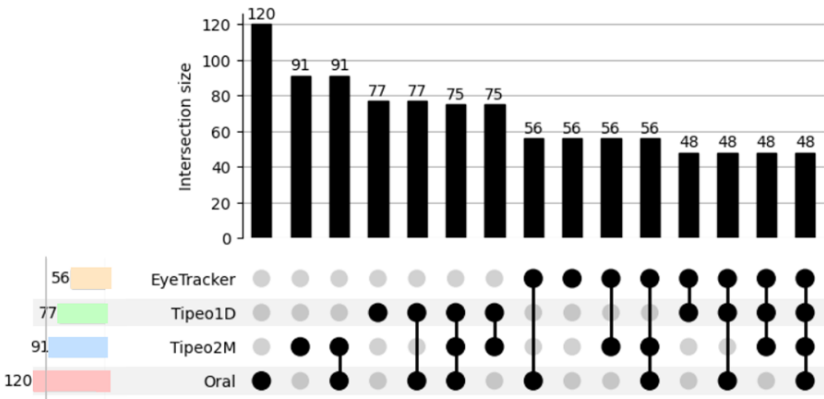
Cantidad de palabras producidas por minuto (PPM) según la modalidad, con su desviación estándar y reducción relativa respecto de la oralidad.

Modalidad	PPM Media	DS	% de reducción vs. oralidad
Oral	142	31	-
Tipeo 2 manos	34	12	76.06
Tipeo 1 dedo	26	6	81.69
Eye tracker	5	2	96.48

Más allá de la velocidad, el interés central radicó en la cantidad de información transmitida y su diversidad léxica. Para ello, se calculó la entropía de Shannon, considerando el núcleo de palabras —sustantivos, verbos y adjetivos— como portador principal de información semántica. En la modalidad oral, este núcleo comprende aproximadamente 120 palabras, mientras que en las modalidades restringidas disminuye su tamaño proporcionalmente (Figura 1). La pérdida de velocidad se acompaña de una reducción en la entropía de Shannon, que mide la variabilidad y complejidad del vocabulario empleado. La entropía se calculó sobre las distribuciones de frecuencia de las palabras, y posteriormente se normalizó temporalmente para obtener la entropía por minuto (EPM), que refleja la cantidad de información producida por unidad de tiempo.

Figura 1

Número de palabras en el núcleo principal y superposición entre modalidades



La Tabla 2 resume los valores medios de EPM y su reducción porcentual respecto de la modalidad oral. Se observa un descenso pronunciado de la tasa informativa con la disminución de grados de libertad: el tipeo con dos manos conserva aproximadamente el 27 % de la entropía por minuto de la modalidad oral, el tipeo con un dedo un 22 %, y la comunicación con *eye tracker* solo un 7 %. En la Figura 2 se ilustra el decaimiento de esta métrica por participante, evidenciando la pérdida progresiva de información a medida que la motricidad se restringe.

Tabla 2

Entropía por minuto (EPM) por modalidad, con su desviación estándar y porcentaje de reducción respecto de la oralidad.

Metodología	EPM Media	DS	% de reducción vs. oralidad
Oral	4.83	2.20	-
Tipeo 2 manos	1.26	0.53	73.9%
Tipeo 1 dedo	1.02	0.40	78.8%
Eye tracker	0.30	0.21	93.9%

Estos resultados muestran que la reducción de los grados de libertad no solo afecta la velocidad, sino también la riqueza informacional y la variabilidad léxica, coherentemente con observaciones previas sobre la relación entre motricidad y complejidad comunicativa (Koplenig & Müller-Spitzer, 2016). Finalmente, se analizó la estructura interna del discurso mediante las distribuciones de frecuencia de las palabras. Tal como se observa en la Figura 3, las producciones narrativas de todas las modalidades —oral, tipeo y eye tracking— siguen una ley de potencias, lo que confirma la conservación de la organización jerárquica del lenguaje. Resulta haber invariancia de escala o fractalidad lingüística: la relación entre palabras frecuentes y raras se mantiene estable, aún bajo restricciones motoras severas. Esta autosimilitud confirma que el lenguaje preserva su estructura estadística básica incluso cuando se ve limitado en su producción.

Figura 2

Valores de entropía por minuto por modalidad, de cada participante.

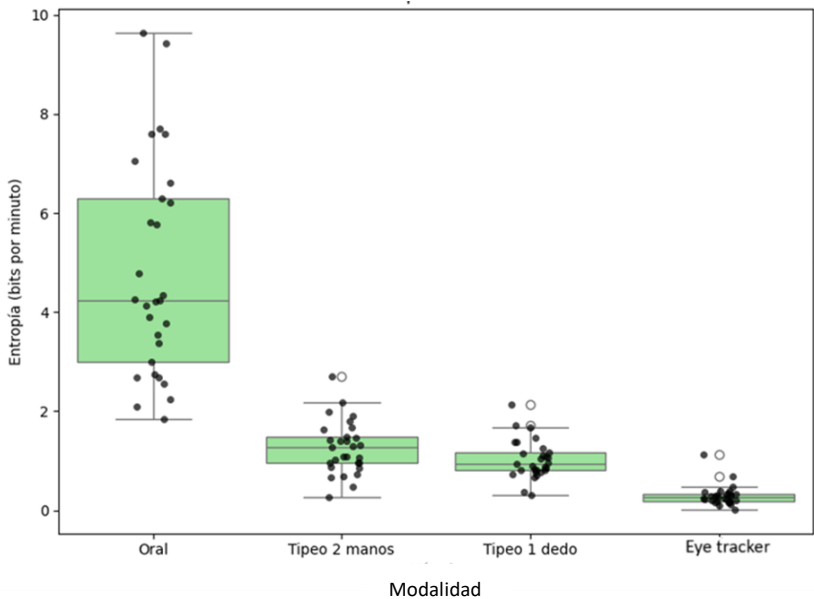
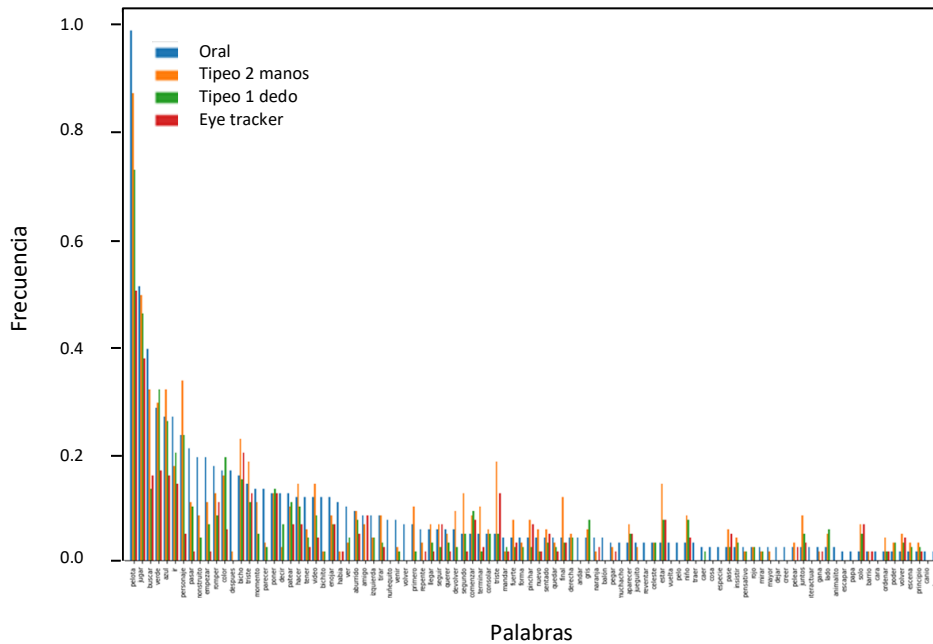


Figura 3.

Frecuencia de palabras por modalidad, normalizado respecto a la modalidad oral



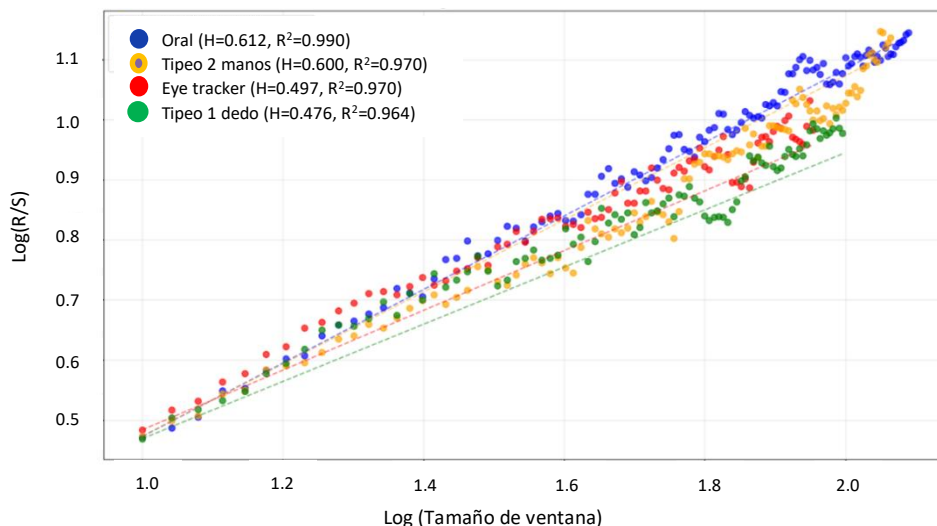
La pendiente de estas distribuciones refleja la organización fractal del lenguaje: unas pocas palabras muy frecuentes concentran la mayor parte del mensaje, mientras que muchas otras aparecen con baja frecuencia. Esta invariancia de escala, visible en los gráficos de frecuencia y en los ajustes log-log (Figura 4), muestra que la estructura lingüística se conserva incluso cuando el modo de producción se ve restringido por las condiciones motoras o tecnológicas.

El análisis del exponente de Hurst (H) complementó estos resultados, diferenciando entre modalidades con comportamiento persistente —oralidad ($H = 0.61 \pm 0.01$) y tipeo con dos manos ($H = 0.60 \pm 0.01$)— y aquellas con comportamiento cercano al azar —tipeo con un dedo ($H = 0.48 \pm 0.01$) y *eye tracker* ($H = 0.50 \pm 0.01$)—.

Esta transición cuantifica cómo la reducción de los grados de libertad y el incremento del esfuerzo cognitivo modifican la dinámica del lenguaje, generando una comunicación más fragmentada. En términos de accesibilidad, los resultados refuerzan la necesidad de diseñar sistemas aumentativos que reduzcan la pérdida de información y preserven la coherencia natural del discurso en personas con discapacidades del habla.

Figura 4

Distribuciones log-log de fluctuación vs tamaño de ventana por modalidad, de cada participante.



Conclusiones

Los resultados permiten afirmar que la generación de información lingüística depende directamente del número de grados de libertad motora disponibles durante la comunicación. A medida que se reducen las posibilidades de movimiento, disminuyen significativamente la velocidad de producción, la entropía y la diversidad léxica, evidenciando una pérdida sustancial en la eficiencia informacional del lenguaje.

Esta evidencia empírica destaca que la comunicación debe comprenderse como un fenómeno físico y cognitivo simultáneo, en el cual las restricciones motoras afectan tanto el ritmo expresivo como la estructura y riqueza del mensaje. Los hallazgos refuerzan la necesidad de diseñar entornos comunicativos y tecnologías asistivas que compensen esta pérdida informacional y amplíen las posibilidades expresivas de las personas con discapacidad motora o del habla. En este sentido, resulta fundamental centrar la atención en las condiciones de los entornos, generando propuestas que se ajusten a estas formas diversas de producción y no a la inversa, respetando los tiempos que estas modalidades requieren.

Si bien los resultados fueron obtenidos con participantes sin discapacidad motora, deben interpretarse como una aproximación experimental controlada al fenómeno, considerando que podrían existir variaciones al extender el análisis a otros perfiles de usuarios. No obstante, el hecho de que participantes sin alteraciones motoras o del habla evidencien igualmente dificultades significativas en estas modalidades de comunicación permite inferir que dichas limitaciones no dependen exclusivamente de las condiciones individuales, sino también de las restricciones inherentes a los sistemas de comunicación alternativos utilizados para sustituir la comunicación oral.

En este marco, la cuantificación objetiva de esta pérdida mediante métricas derivadas de la teoría de la información, como la entropía de Shannon, constituye un aporte metodológico relevante. Estas herramientas proporcionan criterios científicos para evaluar la eficiencia de los sistemas alternativos y aumentativos de comunicación, así como para orientar el desarrollo de dispositivos y entornos más accesibles, adaptativos y acordes con las diversas modalidades de interacción comunicativa.

Los hallazgos obtenidos también poseen implicancias directas para el diseño de prácticas educativas y sociales inclusivas. En particular, ponen de relieve la necesidad de generar condiciones que respeten los tiempos y características propias de estas modalidades comunicativas, favoreciendo formas de participación efectivas y el reconocimiento de las producciones de todos los sujetos. En consecuencia, los diferentes contextos familiares, sociales, educativos y laborales de las personas con condiciones de salud que afectan el habla y la comunicación deberían adaptarse activamente a estas formas diversas de interacción, promoviendo una inclusión plena, efectiva y equitativa.

En conjunto, el estudio consolida un enfoque interdisciplinario que vincula los fundamentos de la física con los desafíos de la educación inclusiva. Desde esta perspectiva, la comunicación se concibe como un derecho humano esencial y un proceso susceptible de ser analizado y optimizado. Los resultados subrayan, así, la necesidad de promover entornos educativos y tecnológicos que garanticen la comunicación plena, integrando ciencia y tecnología como pilares de inclusión y equidad social.

Bibliografía

- Bernstein, N. (1967). *The co-ordination and regulation of movements*. Pergamon Press.
- Cotrufo, T. (2020). *En la mente del niño: El cerebro en sus primeros años*. Shackleton.
- Goldstein, H., Poole, C., & Safko, J. (2002). *Classical mechanics* (3rd ed.). Addison Wesley.
- INDEC. (2018). *Estudio nacional sobre el perfil de las personas con discapacidad*. Instituto Nacional de Estadística y Censos.
- Koplenig, A., & Müller-Spitzer, C. (2016). Entropy in language production: Insights from writing processes. In *Proceedings of the 10th International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC)*.
- Light, J. C., McNaughton, D., & Caron, J. (2019). New and emerging AAC technology supports for children with complex communication needs. *Augmentative and Alternative Communication*, 35(1), 26–41. <https://doi.org/10.1080/07434618.2018.1556736>
- Maeda, S. (1990). Compensatory articulation during speech: Evidence from the analysis and synthesis of vocal-tract shapes using an articulatory model. In W. J. Hardcastle & A. Marchal (Eds.), *Speech production and speech modelling* (pp. 131–149). Springer.
- Montemurro, M. A., & Zanette, D. H. (2011). Universal entropy of word ordering across linguistic families. *PLoS ONE*, 6(5), e19875. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019875>
- París, Luis & Seno, Vanesa (2019). "Milo y Amalia" y "Bichos", videos de la Prueba de Producción Narrativa.

- Parrell, B., Ramanarayanan, V., Nagarajan, S., & Houde, J. (2019). The FACTS model of speech motor control: Fusing state estimation and task-based control. *PLoS Computational Biology*, 15(9), e1007321. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1007321>
- Romski, M., & Sevcik, R. A. (2005). Augmentative communication and early intervention: Myths and realities. *Infants & Young Children*, 18(3), 174–185. <https://doi.org/10.1097/00001163-200507000-00002>
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>